ВЫБОРЫ ПРЕЗИДЕНТА РОССИИ
15–17 МАРТА 2024

МЕЖДУНАРОДНЫЙ КОСЫГИНСКИЙ ФОРУМ

Российский государственный университет
имени А. Н. Косыгина
(Технологии. Дизайн. Искусство)

IV МЕЖДУНАРОДНЫЙ КОСЫГИНСКИЙ ФОРУМ

ПРОБЛЕМЫ ИНЖЕНЕРНЫХ НАУК: ФОРМИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СУВЕРЕНИТЕТА



Международный научно-технический симпозиум

«Повышение энергоресурсоэффективности, экологической и технологической безопасности процессов и аппаратов химической и смежных отраслей промышленности», посвященный 120-летию со дня рождения П.Г. Романкова (ISTS «EESTE-2024»)

I ТОМ

2024

ПРОБЛЕМЫ ИНЖЕНЕРНЫХ НАУК: ФОРМИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СУВЕРЕНИТЕТА

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ А. Н. КОСЫГИНА (ТЕХНОЛОГИИ. ДИЗАЙН. ИСКУССТВО)

ЧЕТВЕРТЫЙ МЕЖДУНАРОДНЫЙ КОСЫГИНСКИЙ ФОРУМ «ПРОБЛЕМЫ ИНЖЕНЕРНЫХ НАУК: ФОРМИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СУВЕРЕНИТЕТА», ПОСВЯЩЁННЫЙ 120-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ А. Н. КОСЫГИНА

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СИМПОЗИУМ «ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОРЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТИ, ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОЦЕССОВ И АППАРАТОВ ХИМИЧЕСКОЙ И СМЕЖНЫХ ОТРАСЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ», ПОСВЯЩЕННЫЙ 120-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ П. Г. РОМАНКОВА (ISTS«EESTE-2024»)

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

(ТОМ 1)

МОСКВА
20 — 22 ФЕВРАЛЯ 2024 ГОДА

УДК 66.02(06)
П 42

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОРЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТИ, ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОЦЕССОВ И АППАРАТОВ ХИМИЧЕСКОЙ И СМЕЖНЫХ ОТРАСЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ [ТЕКСТ]: сборник научных трудов международного научно-технического симпозиума, посвящённого 120-летию со дня рождения П. Г. Романкова (ISTS «EESTE-2024»): Т. 1 /М: ФГБОУ ВО «РГУ им. А. Н. Косыгина», 2024. – 344 с.

ISBN 978-5-00181-550-1

В сборник включены научные материалы российских и зарубежных ученых, в которых приводятся результаты научных исследований энергоресурсоэффективных процессов и технологических систем, рассматриваются современные пути повышения энергоресурсоэффективности и экологической безопасности процессов и аппаратов химической и смежных отраслей промышленности.

ISBN 978-5-00181-550-1

УДК 66.02(06)

© ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина», 2024
© Авторы статей, 2024

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СИМПОЗИУМ «ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОРЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТИ, ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОЦЕССОВ И АППАРАТОВ ХИМИЧЕСКОЙ И СМЕЖНЫХ ОТРАСЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ», ПОСВЯЩЕННЫЙ 120-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ П. Г РОМАНКОВА (ISTS«EESTE-2024»)

ПРОВОДИТСЯ В РГУ ИМЕНИ А.Н. КОСЫГИНА В РАМКАХ ЧЕТВЁРТОГО МЕЖДУНАРОДНОГО КОСЫГИНСКОГО ФОРУМА «СОВРЕМЕННЫЕ ЗАДАЧИ ИНЖЕНЕРНЫХ НАУК» 20 — 22 ФЕВРАЛЯ 2024 ГОДА

Организаторами Форума и Симпозиума являются:

- Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
- Министерство промышленности и торговли Российской Федераций
- Российская академия наук
- Российский Союз научных и инженерных общественных объединений
- Всекитайская Ассоциация по науке и технике (CAST)
- Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)
- Российское химическое общество имени Д.И. Менделеева
- Российская инженерная академия
- Евразийский информационно-аналитический консорциум
- Комитет РосСНИО по проблемам энергоресурсоэффективных химических технологий
- Институт общей и неорганической химии имени Н.С. Курнакова РАН
- Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси
- Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий
- Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)
- Московский политехнический университет
- Институт системного программирования имени В.П. Иванникова РАН
- Российский химико-технологический университет имени Д.И.Менделеева
- Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)
- ООО «РН-Сервис» (дочернее Общество ПАО «НК «Роснефть»)

Рабочие языки Симпозиума: русский и английский.
Материалы публикуются в авторской редакции.

ПРОГРАММНЫЙ (НАУЧНЫЙ) КОМИТЕТ МЕЖДУНАРОДНОГО НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО СИМПОЗИУМА «ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОРЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТИ, ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОЦЕССОВ И АППАРАТОВ ХИМИЧЕСКОЙ И СМЕЖНЫХ ОТРАСЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ», ПОСВЯЩЕННЫЙ 120-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ П. Г РОМАНКОВА (ISTS«EESTE-2024»)

Президент Симпозиума:

Президент Международного и Российского Союзов научных и инженерных общественных объединений,

академик РАН **Гуляев Юрий Васильевич**

Сопредседатели программного (научного) комитета:

Ректор Российского государственного университета имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство) профессор

Белгородский Валерий Савельевич

Президент Российского химического общества имени Д.И. Менделеева

академик РАН **Цивадзе Аслан Юсупович**

Президент Российской инженерной академии, член-корреспондент РАН

Гусев Борис Владимирович

Past Президент Всемирной Федерации инженерных организаций (WFEO)

профессор **Гонг Ке**

Заместитель Президента РАН, член Президиума РАН, член-корреспондент РАН, **Иванов Владимир Викторович**

Член правления РХО имени Д.И. Менделеева, директор Международного института логистики ресурсосбережения и технологической инноватики,

академик РАН **Мешалкин Валерий Павлович**

Директор института системного программирования имени В.П. Иванникова РАН, академик РАН **Аветисян Арутюн Ишханович**

Директор Института общей и неорганической химии имени Н.С.Курнакова РАН, член-корреспондент РАН **Иванов Владимир Константинович**

Учёный секретарь программного (научного) комитета:

профессор РГУ имени А.Н . Косыгина, учёный секретарь Комитета РосСНИО по проблемам энергоресурсоэффективных химических технологий

Кошелева Мария Константиновна

(тел. моб. 8 (926) 355 04 48, e-mail: oxtpaxt@ya.ru).

Информационное обеспечение Симпозиума на сайтах

http://www.eeste.org, http://www.rusea.info,

https://www.chem-com.ru, http://www.rguk.ru, https://etpeb.ru

Состав программного (научного) комитета:

Абиев Р.Ш., проф. (Россия)
Аветисян А.И., академик РАН (Россия)
Акулич А.В., проф. (Беларусь)
Акулич П.В., проф. (Беларусь)
Белгородский В.С., проф. (Россия)
Берентгартен М.Г., проф. (Россия)
Бокова Е.С., проф. (Россия)
Вошкин А.А., чл.-корр. РАН (Россия
Гаряев А.Б., проф. (Россия)
Грунский В.Н., проф. (Россия)
Гуляев Ю.В., акад. РАН (Россия)
Гусев Б.В., чл.-корр. РАН (Россия)
Дорняк О.Р., проф. (Россия)
Друкаренко С.П., д-р (Россия)
Дьяконов С.Г., проф. (Россия)
Жуков В.П., проф. (Россия)
Иванов В.В., чл.-корр. РАН (Россия)
Иванов В.К., чл.-корр. РАН (Россия)
Кильдеева Н.Р., проф. (Россия)
Клинов А.В., проф. (Россия)
Кобраков К.И., проф. (Россия)
Кошелева М.К., проф. (Россия)
Куличихин В.Г., чл.-корр. РАН (Россия)
Кулов Н.Н., проф. (Россия)
Лабутин А.Н., проф. (Россия)
Леонтьев Л.И., акад. РАН (Россия)
Лесовик В.С., чл.-корр. РААСН (Россия)
Липин А.Г., проф. (Россия)
Лукачевский Б.П., д-р. (Россия)
Лысенко А.А., проф. (Россия)
Мажуга А.Г., проф. (Россия)
Макаренков Д.А., д-р (Россия)
Мешалкин В.П., акад. РАН (Россия)
Ольшанская Л.Н., проф. (Россия)
Павлюкевич Н.В., чл.-корр. НАН Р.Беларусь (Беларусь)
Равичев Л.В., проф. (Россия)
Рудобашта С.П., проф. (Россия)
Седляров О.И., проф. (Россия)
Силаков А.В., проф. (Россия)
Сысолятин С.В., чл.-корр. РАН (Россия)
Таранцева К.Р., проф. (Россия)
Федосов С.В., акад. РААСН (Россия)
Флисюк О.М., проф. (Россия)
Фролкова А.К., проф. (Россия)
Хмелёв В.Н., проф. (Россия)
Холькин А.И., акад. РАН (Россия)
Цивадзе А.Ю., акад. РАН (Россия)
Alves-Filho O., prof. (Norway)
Anthony I. Okoh, Prof. (South Africa)
Dang Vu Minh, prof. (Vietnam)
Ditl P., prof. (Czech Reb.)
Gerhardt Ribatski, prof. (Brazil)
Gong K.E., prof. (China)
Kiwi-Minsker Lioubov, prof. (Switzerland)
Levitsky S., prof. (Israel)
Mujumdar Arun S, prof. (Canada, Singapore)
Rieger F., prof. (Czech Reb.)
Ritunesh Kumar, prof. (India)
Tapio Salmi, prof. (Finland)
Ван Синь, проф. (Китай)
Инь Бинь, проф. (Китай, Россия)
Халиков Д.Х., академик НАН Р.Таджикистан (Таджикистан)

ОГЛАВЛЕНИЕ

СЕКЦИЯ 1. «ТЕОРИЯ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЭНЕРГОРЕСУРСОЭФФЕКТИВНЫХ ПРОЦЕССАХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ»

П. В. АКУЛИЧ, Д. С. СЛИЖУК
ПРОНИКНОВЕНИЕ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В РАСТИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И КИНЕТИКА ДЕГИДРАТАЦИИ ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ ЭНЕРГОПОДВОДЕ 12

А. М. БЕССАРАБОВ, В. Е. ТРОХИН, Г. Г. ПРИОРОВ, И. Ю. КИРИЛЛОВА
ЦИФРОВЫЕ CALS-ТЕХНОЛОГИИ ПОДДЕРЖКИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ХИМИЧЕСКОЙ ПРОДУКЦИИ 17

С. П. БОБКОВ, И. А. АСТРАХАНЦЕВА
ПРИМЕНЕНИЕ ДИСКРЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ МОЛЕКУЛЯРНОГО ПЕРЕНОСА 21

В. Е. ТРОХИН, А. М. БЕССАРАБОВ, Д. А. ГРИШАЕВА, А. А. КЛЕВЦОВ
ВИРТУАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НАУЧНО-ПРОМЫШЛЕННОГО КЛАСТЕРА МАЛОТОННАЖНОЙ ХИМИИ 26

И. М. БУРДИН, П. А. СЕВОСТЬЯНОВ
КОМПЬЮТЕРНАЯ ТРИБОМЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ В ОДНОМЕРНОМ ВОЛОКНИСТОМ ПРОДУКТЕ НА БАЗЕ PYTHON 29

В. П. ЖУКОВ, А. Н. БЕЛЯКОВ, И. Д. АКСАКОВСКИЙ
ПРИМЕНЕНИЕ УРАВНЕНИЯ БОЛЬЦМАНА ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЯЧЕЕЧНЫХ МОДЕЛЕЙ 33

М. К. ЗАХАРОВ, Е. А. ГУБКИН, Д. Б. ПЛЕТНЕВ
ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПОИСКА СПОСОБОВ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В ПРОЦЕССАХ РЕКТИФИКАЦИИ 37

А. С. БЕЛОУСОВ, Д. А. ОВСЯННИКОВ
ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ДЛЯ РАСЧЕТА ТРУБНОГО ТЕЧЕНИЯ С ВЫСОКИМ ЧИСЛОМ РЕЙНОЛЬДСА 41

Н. С. КАМАЛОВА, Н. Ю. ЕВСИКОВА, Н. Н. МАТВЕЕВ, А. М. ХВОРЫХ, Ю. В. КРУТСКИХ
ВОЗМОЖНОСТЬ ЦИФРОВОЙ РЕГИСТРАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАРЯДОВ В СТВОЛАХ ДЕРЕВЬЕВ 45

А. Б. КАПРАНОВА, Д. В. СТЕНЬКО, Д. Д. БАХАЕВА, Д. В. ФЕДОРОВА
РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА НЕОДНОРОДНОСТИ ПОЛИМЕРНОЙ СМЕСИ 49

Г. А. НОСОВ, Л. С. ЕЛИНЕВСКАЯ, Р. Н. ИВАНОВ
ВЫБОР ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ БИСЕРНЫХ МЕЛЬНИЦ 54

В. А. ОРЕХОВ
МОДЕЛИРОВАНИЕ СОВМЕЩЕННОГО ТЕПЛОМАССООБМЕННО-ХИМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ОБЖИГА В ДВИЖУЩЕМСЯ СЛОЕ ДИСПЕРСНОГО РУДНОГО ФОСФАТНОГО СЫРЬЯ 59

Д. А. РЫЖКИН, В. М. РАЕВА, Е. В. РЫТОВА
СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ЭНТАЛЬПИЙ ПАРООБРАЗОВАНИЯ БИНАРНЫХ СМЕСЕЙ 63

Н. А. САМОЙЛОВ
РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ СЫРЬЯ И ПЕРСПЕКТИВНЫХ РЕАКТОРНЫХ БЛОКОВ УСТАНОВКИ ГИДРООЧИСТКИ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА 67

Н. Н. СИМАКОВ
СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА МЕЖФАЗНОГО ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА В РАСПЫЛИТЕЛЬНОМ АППАРАТЕ ДЛЯ РЕЖИМОВ ПРЯМО- И ПРОТИВОТОКА ФАЗ .. 72

А. В. СУСЛИН, О. Д. ГИЗАТУЛЛОВ
ВЛИЯНИЕ ПОТЕРЬ ПРИ ОБРАБОТКЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ 76

Н. М. ШАРПАР, Л. И. ЖМАКИН, И. Н. ВЛАСОВ, А. Н. СОРОКИН
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО НАКОПИТЕЛЯ КАПСУЛЬНОГО ТИПА ДЛЯ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ 79

М. З. ЦИНЦАДЗЕ, М. К. КОШЕЛЕВА, О. Р. ДОРНЯК, В. Т. КАЗУБ, Е. Н. ШИРОКОПОЯС
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭКСТРАГИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ИЗ ХЛОПЧАТОБУМАЖНОЙ ТКАНИ 85

А. В. СУСЛИН, О. Д. ГИЗАТУЛЛОВ
МОДЕЛЬ СИГНАЛОВ С НЕЛИНЕЙНОЙ ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ 88

Д. А. ГОЛОДНОВ, В. А. АКАТЬЕВ, А. И. ПОЛЬГУЕВ
МОДИФИКАЦИЯ ПОДОГРЕВАТЕЛЯ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АЭС 93

И. Ш. АБДУЛЛИН, С. В. МИРОНОВ
ПРИКЛАДНАЯ ПЛАЗМОХИМИЯ В ПРОЦЕССАХ УПРАВЛЕНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ НЕОРГАНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ 96

SUN KAIMING
CLUSTER HEADS SELECTION ALGORITHM USING PSO IN WIRELESS SENSOR NETWORKS 101

Л. В. ВОЛКОВА, И. М. ИВАНОВ
УПРАВЛЕНИЕ РИСКОМ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОПАСНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ 108

А. П. ПОЛИЕФТОВА, О. И. СЕДЛЯРОВ, М. П. ГУСЬКОВ, Д. В. ШЕВКО, А. В. ФРОЛОВ, Е. В. БАГДАСАРЯН
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНУТРЕННЕЙ АЭРОДИНАМИКИ ЦИКЛОНА — СЕПАРАТОРА ДЛЯ ОЧИСТКИ ВЫБРОСОВ ОТ ЛЕТУЧЕЙ ЗОЛЫ 118

F. GAO, Y. ZHANG, T. LIU, C. SONG
A VEHICLE RE-IDENTIFICATION METHOD BASED ON RANDOM OCCLUSION 122

О. И. СЕДЛЯРОВ, Е. С. БОРОДИНА, Т. Е. КАДАНЦЕВА, А. В. ЧУГАРОВА, Д. Н. ЯРОВОЙ , Б. АЛИ
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕТРОВОГО РЕЖИМА ТЕРРИТОРИИ КРУПНЫХ ТЕХНОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ 129

Е. Н. ГУЖАВИНА, О. В. СИРОТКИНА, С. В. ШКУРИХИНА, Е. С. БОРОДИНА
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА ОБУВИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ANYLOGIC 134

F. YANG, G. LI, J. ZHANG, Z. SUN, R. ZHANG, L. ZHAO
OCEAN DECIMETER-LEVEL REAL-TIME BDS PRECISE POINT POSITIONING BASED ON SHORT MESSAGE COMMUNICATION 139

О. И. СЕДЛЯРОВ, Е. С. БОРОДИНА, Т. Е. КАДАНЦЕВА, А. В. ЧУГАРОВА, Д. Н. ЯРОВОЙ, Б. АЛИ
ОЦЕНКА И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ НА ФОРМИРОВАНИЕ ВЕТРОВОГО РЕЖИМА ТЕРРИТОРИИ 157

СЕКЦИЯ 3. «ПРОЦЕССЫ И СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ТЕХНОСФЕРЫ (ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ, УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ)»

А. В. АКУЛИЧ, В. М. ЛУСТЕНКОВ, В. М. АКУЛИЧ
ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХСТУПЕНЧАТОЙ СИСТЕМЫ ПЫЛЕУЛАВЛИВАНИЯ ЦИКЛОН — ВИХРЕВОЙ ПРОТИВОТОЧНЫЙ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЬ ДЛЯ ОЧИСТКИ ГАЗОВ В ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ..... 164

Е. А. АУРОВА, Л. Д. ИЛЮШИНА, Е. Ю. КВИТКОВА
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФЕРРАТОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ОТ ФАРМАЦЕВТИЧЕСКИХ ПРЕПАРАТОВ..... 168

T. HOU, Y. ZHOU, XU CAO, W. LI, S. ZHANG, Y. ZHAO, LI CHEN, QI AN, L. MENG
EFFECTS OF MICROBIAL INOCULUM ON MICROBIAL COMMUNITY AND ENZYME ACTIVITY INVOLVED IN NITROGEN-SULFUR METABOLISM DURING SEWAGE SLUDGE COMPOSTING..... 171

А. А. КАЗНАЧЕЕВА, И. И. МЕНЬШОВА, Ю. М. АВЕРИНА
АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД МИНЕРАЛЬНЫМИ И ВОЛОКНИСТЫМИ СОРБЕНТАМИ 191

В. Д. ВИНОКУРОВ, Л. Н. ЗВЯГИНА, Ж. Ю. КОЧЕТОВА
СНИЖЕНИЕ ТОКСИЧНОСТИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ..... 195

T. HOU, Y. ZHOU, R. DU, J. LIU, W. LI, S. ZHANG, M. LI, J. CHU, L. MENG
INSIGHTS INTO EFFECTS OF THERMOTOLERANT NITRIFYING AND SULFUR-OXIDIZING INOCULANTS ON NITROGEN-SULFUR CO-METABOLISM IN SEWAGE SLUDGE COMPOSTING..... 199

В. Д. ВИНОКУРОВ, С. Д. ВИНОКУРОВ, Ж. Ю. КОЧЕТОВА
ТЕРМОМЕТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА УЛАВЛИВАНИЯ ПАРОВ БЕНЗИНА 214

Н. В. КЛИПОВ, Г. И. ГУСЕВ, Т. В. ИЗВЕКОВА, Е. Ю. КВИТКОВА, А. А. ГУЩИН
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД, СОДЕРЖАЩИХ КРАСИТЕЛИ, С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФЕРРАТОВ 217

Ю. В. КОТОВА, К. Н. КИСЕЛЕВА, А. А. ИЗВЕКОВА, А. А. ГУЩИН, Е. Ю. КВИТКОВА
ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД ОТ АНТИБИОТИКОВ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ..... 221

Ж. Ю. КОЧЕТОВА, И. И. КОСИНОВА, А. В. МИЛОВАНОВ, А. А. ВОСКРЕСЕНСКИЙ
ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЛЕГКИХ НЕФТЕПРОДУКТОВ В ПОЧВАХ С ПРИМЕНЕНИЕМ «ЭЛЕКТРОННОГО НОСА» НА ПЬЕЗОСЕНСОРАХ 224

В. Г. МАРЧЕНКО, Д. Б. РЫКЛИН
ВЛИЯНИЕ ВИДА СПЕЦИАЛЬНОЙ ОТДЕЛКИ НА ХАРАКТЕР ИЗМЕНЕНИЯ АНТИСТАТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТКАНЕЙ В ПРОЦЕССЕ СТИРОК 230

А. И. КАРАВАЕВ, О. Г. ЛЮБСКАЯ
ПОВТОРНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТБО: ПЕРСПЕКТИВЫ И СЛОЖНОСТИ 235

Л. В. НЕФЕДОВА, Д. А. СОЛОВЬЕВ
СОВРЕМЕННЫЕ РИСКИ В ВЕТРОЭНЕРГЕТИКЕ РОССИИ 239

О. В. СЕВОСТЬЯНОВА, Ж. Ю. КОЧЕТОВА
О ХАРАКТЕРИСТИКАХ ПОЛИМЕРНЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОЦЕССОВ МЕХАНИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ 244

Б. С. ТАХА, Н. В. АЛЕКСЕЕВА
КОМБИНИРОВАННЫЕ И ГИБРИДНЫЕ СИСТЕМНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД 247

С. В. ФЕДОСОВ, А. А. ЛАЗАРЕВ, Д. Е. ЦВЕТКОВ, А. Ю. КОМЛЁВ
ВЕРОЯТНОСТНЫЙ ПОДХОД К ОРГАНИЗАЦИИ ПРОВЕРКИ КАЧЕСТВА ОГНЕЗАЩИТНОЙ ОБРАБОТКИ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ 252

В. А. ХАРИНА, И. Н. РОССАЛО
АНАЛИЗ МЕТОДОВ БОРЬБЫ СО СНЕЖНО-ЛЕДЯНЫМИ ОТЛОЖЕНИЯМИ НА ДОРОГАХ ГОРОДА НОВОСИБИРСКА 257

И. В. КОСТЮЧЕНКО, А. В. СТАРЫХ, О. Г. ЛЮБСКАЯ
ВЫБОР ПРИОРИТЕТНЫХ ВИДОВ ТОПЛИВА ДЛЯ КОТЕЛЬНЫХ МУНИЦИПАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ 261

Н. С. ШУЛАЕВ, Р. Р. КАДЫРОВ, В. В. ПРЯНИЧНИКОВА
ОПРЕДЕЛЕНИЕ СХЕМ РАЗМЕЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОДОВ ДЛЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ ГРУНТОВ ОТ ТЕХНОГЕННЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ. 264

А. А. РОСЛЫЙ, О. И. СЕДЛЯРОВ
МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОКЛИМАТА РАБОЧЕЙ ЗОНЫ МОКРЫХ ЦЕХОВ КОЖЕВЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ 267

К. В. ЧЕРНОВ
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЗАЩИТЫ ОТ ОПАСНОСТЕЙ НА ОСНОВЕ ВАРИОФИКАЦИИ ТЕХНОГЕННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ 269

Д. А. СМИРНОВА
ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫХ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ИНДУСТРИИ ТУРИЗМА 274

А. А. МИШИНА, О. И. СЕДЛЯРОВ
ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ВРЕДНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ФАКТОРОВ ПРИ ЭКСТРУЗИИ КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ 279

СЕКЦИЯ 4. «СОВРЕМЕННЫЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫЕ ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ НОВЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ И НАНОМАТЕРИАЛОВ»

Г. Ф. БАЙГУЖИН, Е. С. БОКОВА, П. Б. МАЛЫШЕВ, В. Р. КУРБАНГАЛЕЕВ, П. С. ШМЕЛИН, Е. П. ГРЕБЕННИКОВ
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА МАГНЕТРОННОГО НАПЫЛЕНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ФУНЦИОНАЛЬНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ НОСИТЕЛЕЙ С ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИМИ СВОЙСТВАМИ 284

Л. И. ЗОЛИНА, Э. Ю. ЕФРЕМОВА, И. И. АНДРУСЕНКО
ИЗУЧЕНИЕ СПОСОБНОСТИ К ДЕГРАДАЦИИ БИОПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНОК НА ОСНОВЕ ПОЛИКАПРОЛАКТОНА И ПОЛИЛАКТИДА ПРИ КОМПОСТИРОВАНИИ В МОДЕЛЬНОЙ СРЕДЕ 288

L. WEI, Y. DONG, Y. SUN, X. MEI, X. MA, J. SHI, Q. YANG, Y. JI, Z. ZHANG, H. SUN, X. SUN, S. SONG
ANTI-CANCER PROPERTY OF HEMP BIOACTIVE PEPTIDES IN HEP3B LIVER CANCER CELLS THROUGH AKT/GSK3B/B-CATENIN SIGNALING PATHWAY 293

Э. И. МАМЕДОВ, Е. Н. КАЛМЫКОВА
ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЫКВЕННОГО ПЕКТИНА И ЕГО КОМПЛЕКСА С КАТИОНАМИ МЕДИ 304

Ю. И. МАРУЩАК, Н. Н. ЯСИНСКАЯ, Н. В. СКОБОВА
ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА СУШКИ ТКАНИ СО ВСПЕНЕННЫМ ПОЛИУРЕТАНОВЫМ ПОКРЫТИЕМ 308

К. Ю. СТРУНКИНА, П. Н. РУДОВСКИЙ
ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОГО НАПРАВЛЕНИЯ АРМИРОВАНИЯ КОМПОЗИТОВ НА ТЕКСТИЛЬНОЙ ОСНОВЕ 312

М. А. СЕРЕДИНА
ПОЛУЧЕНИЕ УГЛЕРОДНЫХ СОРБЕНТОВ ИЗ ВОЗОБНОВЛЯЕМОГО РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ 317

А. С. СТАВРОПОЛЬЦЕВА, И. И. МЕНЬШОВА*, Л. В. РЕДИНА
РЕЦИКЛИНГ КАК СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ВОЛОКОН 322

Н. А. ЧАПАКСОВ, Р. А. СТОЛЯРОВ, Т. П. ДЬЯЧКОВА
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ МОДИФИКАЦИИ ЙОДОМ НА СТРУКТУРУ И ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ГРАФЕНОВЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ 327

А. Н. РАДЮК, А. Н. БУРКИН
СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ВОЛОКНИСТО-НАПОЛНЕННЫХ ПОЛИУРЕТАНОВЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА 331

В. А. ЗАХАРОВА, Н. Р. КИЛЬДЕЕВА
ТЕРМООБРАТИМЫЕ ГИДРОГЕЛИ ПОЛИСАХАРИДОВ МОРСКИХ ВОДОРОСЛЕЙ ДЛЯ ЭКСТРУЗИОННОЙ 3Д-ПЕЧАТИ 336

Д. В. ТЕРИН, Т. А. ТУРАЕВ, М. М. КАРДАШ
ВЛИЯНИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ПРЕДПОДГОТОВКИ ВОЛОКНИСТЫХ СИСТЕМ ПРИ СОЗДАНИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ ГЕТЕРОГЕННЫХ МЕМБРАН МОЗАИЧНОЙ СТРУКТУРЫ СО ВСТРОЕННЫМИ “CORE-SHELL” НАНОЧАСТИЦАМИ 339

СЕКЦИЯ 1. «ТЕОРИЯ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЭНЕРГОРЕСУРСОЭФФЕКТИВНЫХ ПРОЦЕССАХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ»

УДК 66.047:536.24 DOI: 10.37816/eeste-2024-1-12-16

ПРОНИКНОВЕНИЕ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В РАСТИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И КИНЕТИКА ДЕГИДРАТАЦИИ ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ ЭНЕРГОПОДВОДЕ
PENETRATION OF INFRARED RADIATION INTO PLANT MATERIALS AND KINETICS OF DEHYDRATION UNDER COMBINED ENERGY SUPPLY

Пётр Васильевич Акулич, Дмитрий Станиславович Слижук
Piotr V. Akulich, Dmitriy S. Slizhuk

Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, Беларусь, Минск
A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Science of Belarus, Minsk
(e-mail: akul@hmti.ac.by)

Аннотация: Обсуждаются результаты экспериментальных исследований и численного моделирования распределения температуры в образцах растительных материалов при инфракрасном облучении. Выполнен анализ глубины проникновения инфракрасного излучения во влажные растительные материалы (картофель, яблоки). Анализируется кинетика дегидратации растительных материалов в виброкипящем (интенсивно перемешиваемом) слое при радиационно-конвективном энергоподводе. Данные исследования могут быть полезны при создании энергоэффективных технологий терморадиационной обработки и сушки растительных материалов.

Abstract: The results of experimental studies and numerical modeling of temperature distribution in samples of plant materials under infrared exposure are discussed. An analysis of the penetration depth of infrared radiation into wet plant materials (potatoes, apples) was carried out. The kinetics of dehydration of plant materials in an intensively mixed (vibro-boiling) layer with radiation-convective energy supply is analyzed. These studies can be useful in creating energy-efficient technologies for thermoradiation processing and drying of plant materials.

Ключевые слова: тепломассоперенос в дисперсном слое, радиационно-конвективная сушка, сушка растительных материалов.

Keywords: heat and mass transfer in a dispersed layer, radiation-convective drying, drying of plant materials

Расчет теплопереноса в нелинейных неоднородных средах и вызываемых им теплофизических и химических процессов является актуальной задачей в разнообразных секторах промышленности и научных исследований. Аналитические решения этих задач не существуют, а все попытки все-таки получить их требуют таких упрощений, что зачастую выхолащивается начальный физический смысл моделируемых процессов. Поэтому приходится прибегать к численным методам, которые часто разрабатываются применительно к конкретным процессам, то есть не имеют алгоритмической универсальности. Сравнение различных подходов к построению подобных моделей показал, что достаточно универсальные алгоритмы моделирования могут быть построены на основе математических моделей, базирующихся на теории цепей Маркова. Теоретические основы применения этого подхода в химической инженерии описаны в работах [1,2]. В работе [3] описано его приложение к моделированию распределения температуры и фазового состояния в стержне, расплавляемом периодически движущимся локальным тепловым источником. Однако непосредственно применить полученные результаты к более широкому спектру задач невозможно, так как они

относятся к однородной (однослойная) среде с Инфракрасное излучение (ИК) находит широкое применение в различных современных теплотехнологиях в процессах термообработки и сушки тонких материалов и покрытий, в том числе материалов растительного происхождения. Преимуществом терморадиационного способа по сравнению с конвективным является возможность воздействия на обрабатываемый материал тепловыми потоками с высокой интенсивностью.

В последнее время находят развитие исследования, направленные на повышение эффективности процессов и технологий сушки и тепловой обработки растительных материалов на основе комбинированных и нестационарных способов подвода энергии, в том числе с применением инфракрасного излучения. В ряде работ [1–6] отмечается эффективность терморадиационного подвода энергии и целесообразность сочетания его с другими способами, в частности конвективным, вакуумным, сублимационным.

Эффективность применения инфракрасного излучения связано с учетом оптических свойств материала. Последние зависят как от свойств сухого скелета, так и от влажности, состояния поверхности, длины волны и других характеристик. Влагосодержание материала оказывает неоднозначное влияние на его оптические свойства [7]. В работе [7] указывается, что глубина проникновения коротковолнового ИК-излучения в некоторые пищевые продукты достигает 7−30 мм. Однако доля энергии излучения, проникающего на глубину 6 мм и более, сравнительно невелика.

При инфракрасном облучении материала температура поверхностного слоя обычно быстро повышается, особенно при удалении связанной влаги. Растительные материалы термочувствительны и при нагревании выше допустимой температуры теряют качество. В связи с этим все шире развиваются исследования с нестационарным (циклическим, импульсным) воздействием, которые позволяют не только интенсифицировать тепломассообмен и повысить эффективность процессов сушки, но и снизить негативное тепловое влияние.

Исследование и анализ глубины проникновения инфракрасного излучения в растительные материалы осуществлялось на основе экспериментальных данных и численного моделирования переноса теплоты в материале [8]. Рассматривается образец материала в виде пластины. Толщина пластины δ намного меньше других её размеров и больше глубины проникновения Δ инфракрасного излучения в материал. Исследуемый образец укладывается на горизонтальную плоскую подложку и сверху подвергается инфракрасному облучению. Толщина подложки алюминиевой составляла 2 мм, фторопластовой 3 мм, а ширина образца 0.05 м.

В качестве излучателя применялся керамический нагреватель марки ИКН-101 фирмы «Номакон». Температура поверхности ~700°С. Применялся также кварцево-галогенный термоизлучатель (КГТ) фирмы «Сильвания». Цветовая температура излучателя 2400 К. Мощности излучателей 1 кВт. Они снабжались отражающим экраном и располагались на расстоянии 0,3 м от поверхности образца.

Для снижения влияния испарения и массопереноса на теплоперенос образец подвергался кратковременному нагреванию. Поскольку скорость распространения теплоты намного больше, чем переноса влаги, то пренебрегается внутренним переносом влаги.

Математическая модель включает уравнение теплопереноса в образце материала с учетом поглощения ИК-излучения, уравнение теплопроводности для подложки. Количество теплоты, выделяемое в образце материала при воздействии инфракрасного излучения

$$I = kq_0\left(1-R\right)\exp\left(-kx\right), \qquad (1)$$

где k — коэффициент поглощения, м$^{-1}$; q_0 — плотность потока инфракрасного излучения, падающего на образец, Вт/м^2; R — коэффициент отражения.

Сток теплоты на верхней границе образца за счет испарения влаги при инфракрасном облучении определяется уравнением массоотдачи.

Под глубиной проникновения излучения в среду понимается расстояние, на котором интенсивность излучения внутри материала падает до $1/e$ (около 37%) от его первоначального значения на поверхности (непосредственно под ней). В соответствии с законом Бугера глубина проникновения излучения связана с показателем поглощения соотношением $\Delta = 1/k$.

Приближенный метод расчета глубины проникновения излучения без учета влияния теплопроводности материала базируется на уравнении теплового баланса. Температуру t_2 слоя, соответствующего глубине проникновения излучения, можно определить по соотношению

$$t_2 = t_0 + \frac{t_1 - t_0}{e}, \qquad (2)$$

где t_0, t_1 — начальная и максимальная на поверхности температура образца, °С; e — константа, основание натурального логарифма, $e = 2.718$.

На рисунке 1 представлены температурные зависимости по толщине (координате x) образца сырого картофеля с влажностью $W \approx 83\%$. Зависимости приведены для двух моментов времени $\tau = 61.1$ с (кривые *1–4*) и $\tau = 121.7$ с (кривые *5–7*). Экспериментальные зависимости характеризуются снижением температуры материала в приповерхностном слое до глубины примерно 5−6 мм, а далее она практически постоянна. При небольших временах подобный характер имеют температурные зависимости для яблок. Отметим, что перегиб температурных кривых находится на значительно большем расстоянии от поверхности, чем глубина проникновения инфракрасного излучения, определяемая из численного моделирования. Наиболее быстро прогревается поверхностный слой материала толщиной несколько миллиметров, далее температура заметно снижается и стремится к некоторому постоянному значению. При отсутствии испарения на поверхности образца или интенсивного охлаждения от конвективного воздействия окружающей среды температура поверхности выше температуры приповерхностных слоев. Учет испарения влаги приводит к затратам теплоты и охлаждению поверхности, при этом её температура становится ниже температуры приповерхностных слоев. При этом максимум температуры наблюдается на глубине нескольких миллиметров от поверхности образца. Подобное аномальное распределение температуры наблюдалось в опытах П.Д. Лебедева при нагревании инфракрасным излучением слабообожженной керамической пластины. Оно проявлялось не в начале процесса, а когда температура поверхности образца становилась выше температуры окружающей среды. Аномальное распределение температуры наблюдалось в опытах при нагревании влажного картофеля.

Определялась глубина проникновения инфракрасного излучения в растительные материалы, основываясь на приближенном расчете по формуле (2). В результате получено, что глубина проникновения инфракрасного излучения от керамического излучателя в сырой картофель сорта «Скарб» в виде пластины составляет 4.3–4.8 мм и в среднем равна около 4.5 мм. Аналогичным образом были определены значения глубины проникновения излучения в яблочную пластину (сорт «Редпринц») с влажностью $W \approx 85\,\%$. Среднее значение глубины проникновения составляет около 5.4 мм.

Выполнено численное моделирование глубины проникновения инфракрасного излучения в сырой картофель путем совмещения расчетных и экспериментальных распределений температуры по сечению образца за счет подбора коэффициента поглощения. В расчетах коэффициент поглощения k варьировался в пределах 400–1000, что соответствует глубине проникновения излучения от 1 мм до 2.5 мм (рисунок 1). При этом лучшее совпадение профилей температур имеет место при больших значениях k, т.е. меньших значениях Δ. Как видно, эти величины заметно меньше, чем полученные с использованием формулы (2).

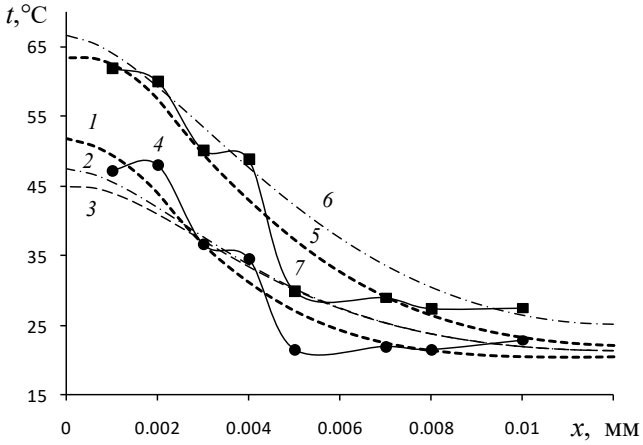


Рисунок 1 — Распределение температуры по толщине образца сырого картофеля при инфракрасном воздействии: *1* — $k = 1000$; $\beta = 0.006$ м/с; *2* — $k = 400$; $\beta = 0$; $q_0 = 8.8 \cdot 10^3$ Вт/м^2; *3* – $k = 400$; $\beta = 0.004$ м/с; *4* — экспериментальная зависимость при $\tau = 61.1$ с; *5* — $k = 1000$; $\beta = 0.006$ м/с; *6* — $k = 400$; $\beta = 0$; *7* — экспериментальная зависимость при $\tau = 121.7$ с

Кинетические зависимости частиц моркови при инфракрасном воздействии в виброкипящем слое и различной скорости фильтрации теплоносителя приведены на рисунке 2. Начальная высота слоя в этих опытах составляла $h_0 = 30$ мм. Меньшая скорость процесса наблюдается при конвективном режиме в виброслое на протяжении 80 мин, а затем в неподвижном состоянии при скорости теплоносителя $v_0 = 0.4$ м/с (кривая *1*).

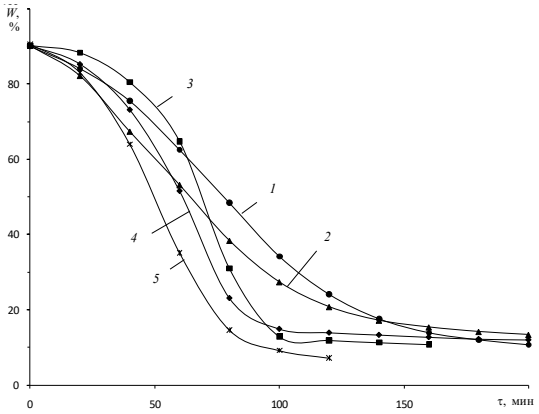


Рисунок 2 — Кинетические зависимости дегидратации частиц моркови в виброкипящем слое при конвективном и радиационно-конвективном энергоподводах: $h_0 = 30$ мм; $A = 3$ мм; $t_1 = 55$°С; *1* — конвективный режим: $0 \le \tau \le 40$ мин, $f = 26$ Гц; $40 < \tau \le 60$ мин, $f = 24$ Гц; $60 < \tau \le 80$ мин, $f = 20$ Гц; далее сушка в неподвижном слое $v_0 = 0.4$ м/с; *2* — $0 \le \tau \le 20$ мин: ИК-излучение непрерывно, $f = 26$ Гц; $20 < \tau \le 40$ мин: $(\tau_{изл} + \tau_п) \times n$: (2+2)×3; (1+1)×4, $f = 24$ Гц; далее конвективный режим $v_0 = 0.4$ м/с; *3* — $v_0 = 0.1$м/с; $0 \le \tau \le 20$ мин: $f = 26$ Гц; $20 < \tau \le 40$ мин: $f = 24$ Гц; $40 < \tau \le 100$ мин: $f = 22$ Гц; при $\tau \le 80$ мин ИК-излучение непрерывно, при $80 < \tau \le 100$ мин: $(\tau_{изл} + \tau_п) \times n$: (2+3)×2; (1+3)×2; далее конвективный режим в неподвижном слое; *4* — режим соответствует кривой *3*, только $v_0 = 0.2$ м/с; *5* – $v_0 = 0.4$ м/с, $f = 22 \div 26$ Гц; $0 \le \tau \le 60$ мин: ИК-излучение непрерывно; $60 < \tau \le 120$ мин: $(\tau_{изл} + \tau_п) \times n$: (3+2)×12

Воздействие на дисперсный слой инфракрасным излучением непрерывно в течение 20 мин, а затем циклически 20 мин и далее чисто конвективным способом увеличивает скорость процесса дегидратации в первом периоде (кривая *2*). В конце процесса его интенсивность заметно падает и соответствует примерно кривой *1*. Уменьшение скорости теплоносителя на входе в слой до 0.1 м/с значительно снижает интенсивность дегидратации в начале процесса (кривая *3*). Появляется четко выраженный период прогрева материала. Однако после прогрева слоя скорость дегидратации становится существенно выше, что обусловлено непрерывным облучением в течение 80 мин и еще в циклическом режиме 20 мин. Конвективная досушка продукта в неподвижном слое приводит к незначительному изменению его влажности. Увеличение скорости теплоносителя до 0.2 м/с приводит с сокращению периода прогрева и росту интенсивности процесса (кривая *4*). Повышение скорости теплоносителя до 0.4 м/с и длительности ИК воздействия до 120 мин способствует дальнейшей интенсификации процесса и сокращению его продолжительности (кривая *5*).

Выводы

На основе теоретических и экспериментальных исследований показано, что значения глубины проникновения на основе численного решения уравнений теплопереноса с использованием закона Бугера заметно меньше, чем величины полученные приближенным методом без учета теплопроводности. Доля потока излучения проникающего в растительные материалы (картофель, яблоки) на глубину более 5–6 мм незначительна. С уменьшением длины волны, повышением температуры излучателя в исследованной области глубина проникновения излучения возрастает.

Показана возможность интенсификации процесса дегидратации и сокращения его продолжительности в виброкипящем или интенсивно перемешиваемом слое при ступенчатом радиационно-конвективном подводе теплоты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акулич П.В., Слижук Д.С. Тепломассоперенос в плотном слое при дегидратации коллоидных и сорбционных капиллярно-пористых материалов в условиях нестационарного радиационно-конвективного энергоподвода // *Теоретические основы химической технологии*. 2022. Т. 56, № 2. С. 148–157.

2. Акулич П.В., Акулич А.В. Конвективные сушильные установки: методы и примеры расчета. Минск: Вышэйшая школа, 2019. 376 с.

3. Сажин Б. С., Кошелева М. К., Сажина М. Б. Процессы сушки и промывки текстильных материалов. М.: ФГБОУ ВПО «МГУДТ», 2013. 126 с.

4. Рудобашта С.П., Зуева Г.А., Зуев А.И. Осциллирующая инфракрасная сушка и стимуляция семян. Тезисы докладов и сообщений XV Минского межд. форума по тепло- и массообмену 23–26 мая 2016. Минск, 2016. Т. 3. С. 191–195.

5. Sakare P., Prasad N., Thombare N., Singh R. and Sharma S.C. Infrared Drying of Food Materials: Recent advances // *Food Engineering Reviews*. 2020. Vol. 12. P. 381–398.

6. Li K., Zhang M., Mujumdar A.S. and Chitrakar B. Recent developments in physical field-based drying techniques for fruits and vegetables // *Drying Technology*. 2019. Vol. 37. Iss. 15. pp. 1954–1973.

7. Гинзбург А.С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов. Москва: Пищевая промышленность, 1973. 528 с.

8. Акулич П. В., Слижук Д. С., Акулич А. В. О проникновении инфракрасного излучения в растительные материалы при терморадиационном воздействии // *Инженерно-физический журнал*. 2023. Т. 96, № 2. С. 401–407.

УДК 66.011 DOI: 10.37816/eeste-2024-1-17-21

ЦИФРОВЫЕ CALS-ТЕХНОЛОГИИ ПОДДЕРЖКИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ХИМИЧЕСКОЙ ПРОДУКЦИИ
DIGITAL CALS TECHNOLOGIES TO SUPPORT THE LIFE CYCLE OF CHEMICAL PRODUCTS

Аркадий Маркович Бессарабов, Василий Евгеньевич Трохин, Георгий Германович Приоров, Ирина Юрьевна Кириллова
Arkadiy M. Bessarabov, Vasiliy E. Trokhin, Georgiy G. Priorov, Irina Yu. Kirillova

АО Научный центр «Малотоннажная химия», Россия, Москва
R&D Centre "Fine Chemicals", Russia, Moscow
(e-mail: bessarabov@nc-mtc.ru)

Аннотация: Проведен анализ основных задач, связанных с разработкой и внедрением концепции CALS в химической промышленности. Разработаны теоретические основы и программная реализация важнейших этапов «жизненного цикла» в технологии особо чистых веществ, нанотехнологии, биотехнологии, экологии и др. Созданы типовые протоколы применения основных видов технической документации в CALS-стандарте ISO 10303 STEP.

Abstract: The analysis of the main tasks dealing with the development and the introduction of the CALS concept in the chemical industry was carried out. Perspective CALS projects in the technology of high purity substances, nanotechnology, biotechnology, ecology etc. were considered. Standard protocols of use for the main types of technical documentation in the international CALS-standard ISO 10303 STEP were developed.

Ключевые слова: CALS-технология, автоматизация, химическая промышленность.
Keywords: CALS technology, automation, chemical industry.

Опыт, накопленный в процессе внедрения разнообразных автономных информационных систем, позволил осознать необходимость интеграции различных информационных технологий в единый комплекс, поддерживающий все этапы жизненного цикла (ЖЦ) выпускаемой продукции. К ним относятся этапы маркетинговых исследований, проектирования, технологической подготовки производства, собственно производства, послепродажного обслуживания и эксплуатации продукции, а также утилизации. Для решения этих задач наиболее перспективной системой компьютерной поддержки является CALS-технология (Continuous Acquisition and Life cycle Support – непрерывная информационная поддержка жизненного цикла продукта) [1]. Эффективность внедрения CALS в промышленности США характеризуется следующими количественными оценками [1]: прямое сокращение затрат на проектирование – от 10 до 30%; сокращение времени разработки изделий – от 40 до 60%; сокращение времени вывода новых изделий на рынок – от 25 до 75%; сокращение доли брака и объема конструктивных изменений – от 23 до 73%; сокращение затрат на подготовку технической документации – до 40%; сокращение затрат на разработку эксплуатационной документации – до 30%.

В России активное и успешное внедрение CALS-технологий наблюдается, главным образом, на предприятиях военно-промышленного комплекса [2]. Использование концепции CALS в химической промышленности отражено в основном в публикациях наших сотрудников, работавших во ФГУП «ИРЕА» и работающих в АО Научный центр «Малотоннажная химия» [3]. За последние 20 лет нами проведена практическая реализация конкретных задач химической промышленности с использованием клиентских модулей, разработанных в НИЦ «CALS-технология» [2].

Первые годы работы проводились в программных комплексах PSS Lite или PSS Demo. Lite-версия – это полный клиент PSS и собственный сервер БД (Lite сервер), работающий с собственной встроенной СУБД. Конфигурация Lite имеет ограничения на объем данных. В настоящее время построение CALS-проектов проводится на основе программы PDM STEP Suite Enterprise Edition (PSS-EE), на которую нами приобретена лицензия (APL-3451631-01). PDM STEP Suite представляет собой трехуровневую информационную систему (рисунок 1), состоящую из сервера СУБД (Oracle Server 8.i), сервера приложений (Oracle Client 8.i & PSSOraSrv) и клиентского модуля (PSS). Клиентский модуль обеспечивает диалоговое взаимодействие с БД через сервер приложений.

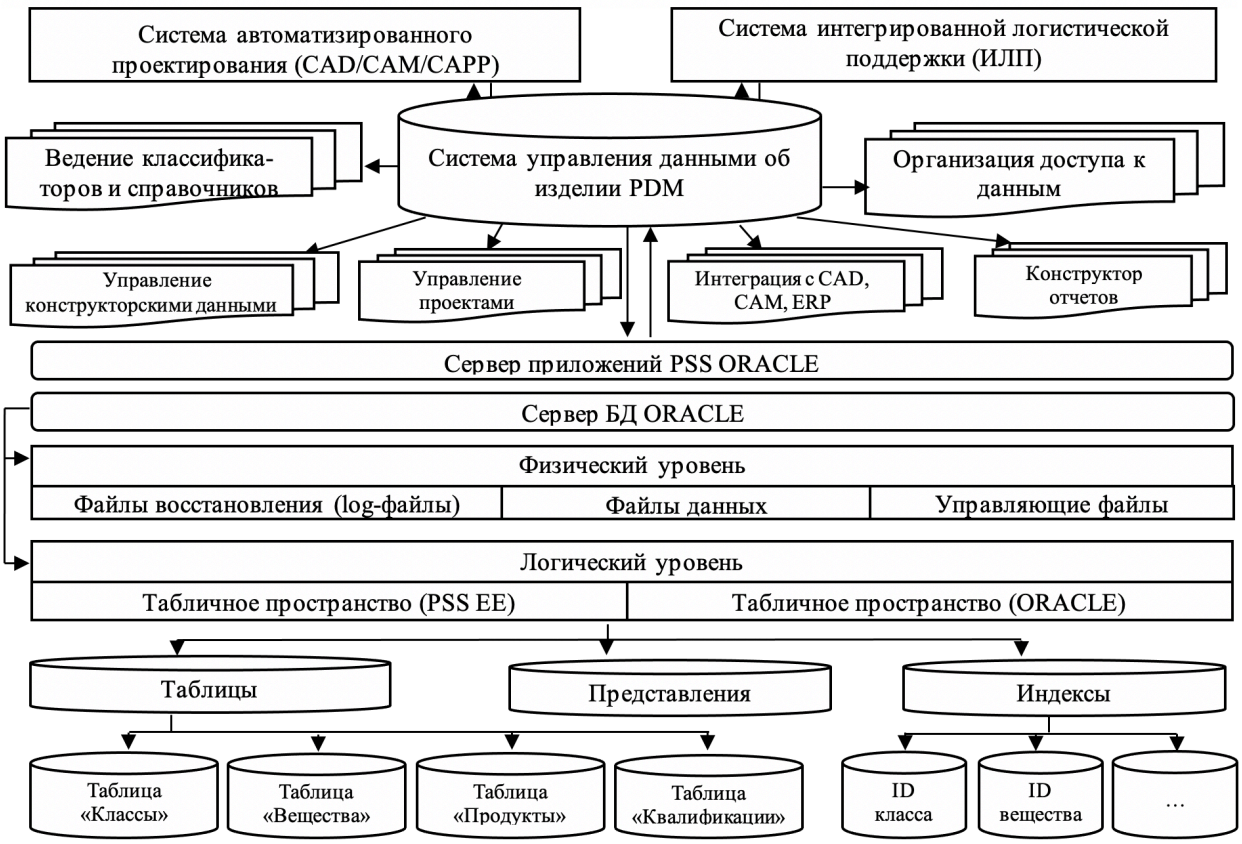


Рисунок 1 — Архитектура системы «сервер (Oracle Server 8.i) – клиентский модуль (PSS)» для предметной области «Химическая промышленность».

Первые исследования проведены нами в 2000 г. в рамках конкурсного проекта Минпромнауки (Минпромторг) России №140-20-19 «Анализ процессов создания промышленной продукции в химическом комплексе и определение первоочередных мероприятий по внедрению CALS-технологий» [4]. В дальнейшем работы выполнялись по коммерческим договорам, государственным контрактам Минобрнауки, Минпромторга России, грантам Европейского Сообщества INTAS № 971-30770 и ECOPHOS № INCO-CT-2005-013359 и гранту РФФИ № 16-07-00823 «Теоретические основы разработки и внедрения автоматизированных CALS-систем управления жизненным циклом научных исследований в химической промышленности».

Основные комплексы работ проводились в технологии химических реактивов и особо чистых веществ [5]. Однако, большое количество CALS-проектов разработано в таких направлениях, как биотехнология [6], материалы дорожной химии (противогололедные реагенты [7], дорожные пропитки [8]) и др. В такой перспективной отрасли, как «Нанотехнология» нами созданы CALS-проекты установок плазменно-криогенного синтеза нанодисперсных порошков [9]. В рамках госконтракта с Минобрнауки России разработан

информационно-аналитический комплекс для создания новых облегченных теплозащитных покрытий, включающий в себя несколько CALS-проектов различной направленности [10].

По направлению «Экология» велись работы в следующих областях: утилизация отходов фосфорной промышленности [11]; влияние противогололедных реагентов на объекты окружающей среды (почвенный покров, водные объекты, зеленые насаждения и атмосферный воздух) [12]; аналитический мониторинг примесей нефтепродуктов в почвенных водах [13]; типовая система водного хозяйства в малотоннажной химии [14]. По каждой тематике разработаны соответствующие информационные CALS-проекты.

Для автоматизированной разработки современных производств на основе информационного CALS-стандарта ISO 10303 STEP созданы типовые схемы (протоколы применения) для основных видов выходной технической документации: технологических регламентов и технических условий. Рассмотрены все виды технологических регламентов: постоянные, временные, пусковые, разовые, лабораторные (пусковые записки, производственные методики).

В технологическом регламенте для проектировщика особый интерес представляет конструкторское электронное описание, которое в соответствии со стандартом ISO 10303 STEP содержит структуру категорий, документы, статусы, группы изделий с их версиями, свойствами, классификациями и др. Благодаря прямой интеграции с CAD-системами, такими как SolidWorks, SolidEdge и AutoCAD, пользователь PSS-EE получает возможность редактировать различные документы.

Так, например, раздел № 13 технологического регламента (ТР 13) содержит чертеж технологической схемы (в формате AutoCAD), а также чертежи и блок-схемы различных стадий производства, которые могут быть открыты для просмотра и изменения в окне AutoCAD. В качестве примера приведен элемент CALS-проекта технологического регламента получения четыреххлористого углерода (ЧХУ) «ос.ч ОП-3» (рисунок 2).

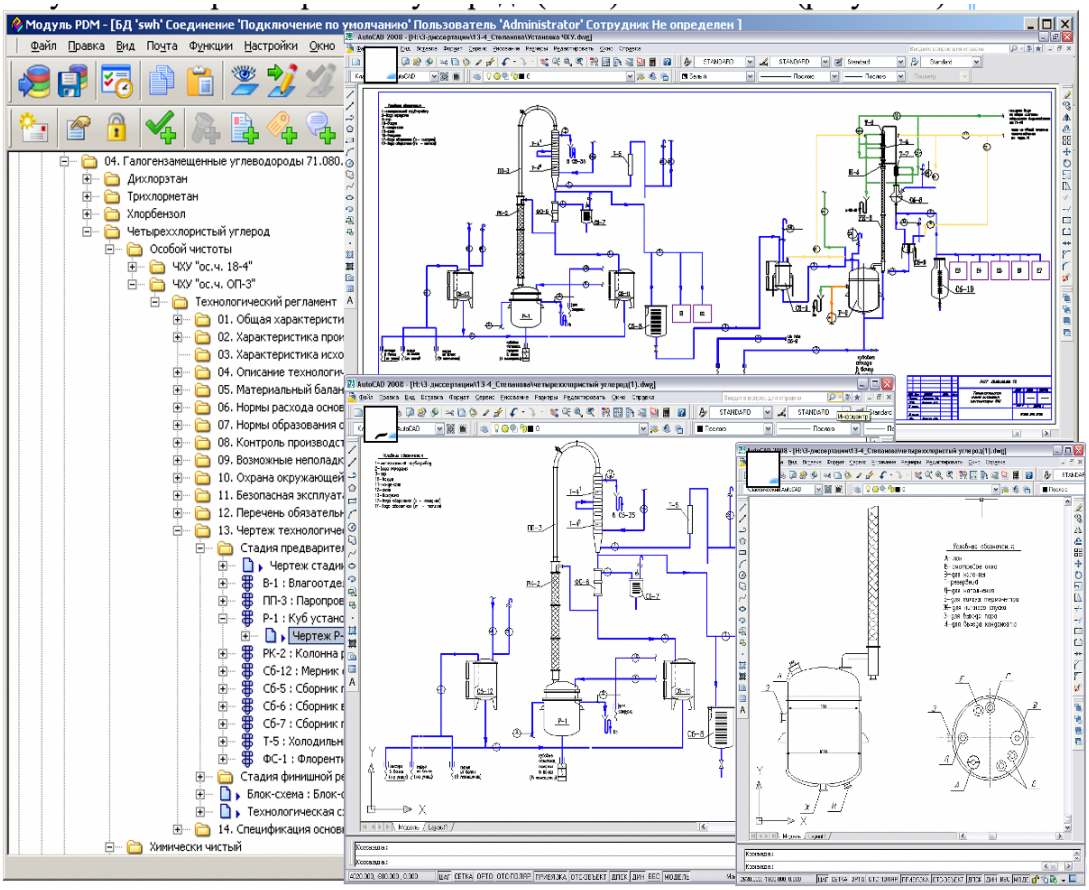


Рисунок 2 — Элемент CALS-проекта по ТР-13 (а - технологическая схема ЧХУ ос.ч ОП-3; б - модуль предварительной ректификации; в - куб ректификационной колонны)

Технологическая схема (рис. 2-а) состоит из двух стадий – предварительной и точной ректификации. Вся совокупность применяемого оборудования занесена в CALS-проект в соответствующие папки. Эта информация накапливается на протяжении всего ЖЦ: характеристики, документы, статусы (результаты согласований), технологическая информация.

При разработке типовой схемы технических условий в основу информационной структуры положен межгосударственный стандарт ГОСТ 2.114-95 [15]. Для информационной поддержки важнейшей категории технических условий (методы анализа) используется, разработанная нами CALS-система компьютерного менеджмента качества (КМК-система) [16]. Система осуществляет ввод, обработку и хранение информации об основных элементах аналитического мониторинга: перечень объектов для контроля (классификатор веществ); сведения об используемых аналитических методах (включая отбор пробы и подготовка ее к анализу); сведения об эксплуатации используемых приборов и метрологическом обеспечении [17].

Применение концепции CALS в рассмотренной предметной области позволяет существенно сократить время и повысить качество выполняемых работ. С помощью современного программного комплекса PSS-EE разработана информационная система, содержащая всю необходимую информацию для генерации основных видов технической документации: технологических регламентов и технических условий производства химической (особо чистой [18]) продукции. В систему занесены такие важные индикаторы, как показатели качества продукции, образцы нормативной документации, чертежи и схемы производства и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акимов С.В., Верхова Г.В., Меткин Н.П. Теоретические основы CALS. – СПб: Издательство СПбГУ, 2018. - 263 с.

2. Блинков Е.В., Шишаев А.М., Назаров В.П. Применение CALS-технологий в условиях разработки и постановки на производство изделий ракетно-космической техники // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2014. Т. 1. № 10. С. 42-43.

3. Bessarabov A., Stepanova T., Zaremba G., Poluboiarinova E. CALS-based computer-aided support in the chemical industry// Chemical Engineering Transactions. 2016. V.52. P. 97-102.

4. Бессарабов А.М., Афанасьев А.Н. CALS-технологии при проектировании перспективных химических производств // Химическая технология. 2002. Т. 3, №3. С.26-30.

5. Bessarabov A., Kvasyuk A. Cybernetic researches in technology of chemical reagents and high-purity substances // Clean Technologies and Environmental Policy. 2015. V. 17. No. 5. P. 1365-1371.

6. Bessarabov A., Kvasyuk A., Stepanova T., Vendilo A. Development of the CALS-technology of drying-agglomeration process in production of biologically active additives of the new generation // Chemical Engineering Transactions. 2015. V. 43. P. 145-150.

7. Глушко А.Н., Бессарабов А.М., Степанова Т.И. Разработка CALS-технологии компьютерного менеджмента качества химических противогололедных материалов и дорожных пропиток на основе методов системного анализа // Наукоемкие технологии. 2013. Т. 14. № 3. С. 75-80.

8. Bessarabov A., Priorov G., Glushko A. The life cycle of the development of road impregnations for motor transport infrastructure // Energy Reports. 2021. Vol. 7. P. 8633-8638.

9. Бессарабов А.М., Иванов М.Я., Квасюк А.В. CALS-технология плазменно-криогенного синтеза нанодисперсного кремния // Российские нанотехнологии. 2012. Т. 7. № 1-2. С. 20-23.

10. Бессарабов А.М., Емельянова О.Н., Степанова Т.И. Разработка нового поколения облегченных композитных теплозащитных материалов на основе концепции CALS // Вестник Казанского технологического университета. 2012. № 12. С. 83-88.

11. Bessarabov A., Bulatov I., Kvasyuk A., Kochetygov A. Utilization of waste for large capacity productions of phosphorus-containing products based on the system analysis methods // Clean Technologies and Environmental Policy. 2010. V. 12. No. 6. P. 601-611.

12. Priorov G., Glushko A., Bessarabov A. Ecological Monitoring of Road Chemistry Materials on Highways // Chemical Engineering Transactions. 2021. V. 88. P. 1273-1278.

13. Trokhin V., Bessarabov A., Sevastyanov D., Trynkina L., Stepanova T., Vendilo A. Determination of oil products in waste and natural waters using tetrachloromethane // Chemical Engineering Transactions. 2013. V. 35. P. 1411-1416.

14. Bessarabov A., Trokhin V., Stepanova T. Ecological system for water treatment in fine chemicals industry enterprises // Clean Technologies and Environmental Policy. 2022. V. 24. No. 2. P. 721-728.

15. Бессарабов А.М., Степанова Т.И., Стоянов О.В. Модернизация компьютерной CALS-системы автоматизированной разработки технической документации для предметной области «особо чистые вещества»// Ремонт, восстановление, модернизация. 2014. №7. С.8-17.

16. Трохин В.Е., Трынкина Л.В., Бессарабов А.М. Аналитический мониторинг особо чистых веществ на основе концепции CALS. Рига, Латвия: «LAP LAMBERT Academic Publishing», 2018. 116 с.

17. Bessarabov A.M., Zhdanovich O.A., Yaroshenko A.M., Zaikov G.E. Development of an analytical quality control system of high-purity chemical substances on the CALS concept basis // Journal of Applied Polymer Science. 2008. V. 110. No. 6. P. 4016–4021.

18. Бессарабов А.М., Трохин В.Е., Трынкина Л.В., Гафитулина К.М. Разработка CALS-системы аналитического мониторинга органических растворителей для фармацевтической промышленности // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2022. № 8. С. 19-26.

УДК 66.011 DOI: 10.37816/eeste-2024-1-21-25

ПРИМЕНЕНИЕ ДИСКРЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ МОЛЕКУЛЯРНОГО ПЕРЕНОСА
APPLICATION OF DISCRETE MODELS FOR STUDYING MOLECULAR TRANSFER PROCESSES

Сергей Петрович Бобков, Ирина Александровна Астраханцева
Sergey P. Bobkov, Irina A. Astrakhantseva

Ивановский государственный химико-технологический университет – ИГХТУ,
Россия, Иваново
(e-mail: bsp@isuct.ru)

Аннотация: Рассмотрены дискретные динамические модели в виде систем детерминированных клеточных автоматов. Представлены основные приемы и общая методология разработки дискретных моделей. Рассмотрены примеры использования систем клеточных автоматов для моделирования некоторых процессов теплопроводности и диффузии.

Abstract: Discrete dynamic models in the form of systems of deterministic cellular automata are considered. The basic techniques and general methodology for developing discrete models are presented. Examples of using cellular automata systems to simulate certain processes of thermal conductivity and diffusion are considered.

Ключевые слова: дискретное моделирование, клеточные автоматы, молекулярный перенос субстанции.

Keywords: discrete simulation, cellular automata, molecular transfer of substance.

В последнее время высказываются суждения о наличии проблем, которые ограничивают применение классических подходов при исследованиях основных процессов химической технологии. Прежде всего, это касается решения задач моделирования процессов в гетерогенных и анизотропных средах, изучения объектов сложной геометрической формы [1]. Одним из направлений моделирования процессов переноса, которое в значительной мере лишено указанных недостатков является использование дискретных динамических моделей и, в частности, систем клеточных автоматов [2].

Система клеточных автоматов – это математическая абстракция, которая позволяет рассматривать непрерывное пространство, как совокупность дискретных элементов – клеток, функционирующих по законам работы абстрактного автомата [3]. В рассматриваемой сфере исследований автомат следует рассматривать как объект, изменяющий свое состояние по шагам дискретного времени $t_0<t_1<t_2< \ldots, t_k \in \Gamma$. В любой момент дискретного времени t_k клетка-автомат может находиться в одном из возможных состояний $z(t_k) \in Z$. На каждом шаге времени под влиянием внешнего воздействия $x(t_k) \in X$ состояние автомата изменяется в соответствии с функцией переходов:

$$z(t_{k+1}) = \varphi[z(t_k), x(t_k)] \quad (1)$$

где: $z(t_{k+1})$ — состояние клетки в момент времени $k+1$; φ – функция переходов.

Отдельные клетки образуют пространственную решетку, размерность и формы которой, в общем случае, произвольные.

При переходе от отдельной клетки к совокупности, составляющей систему клеточных автоматов, возникает задача определения клеток, заполняющих модельное пространство, и описания связей между ними. Место положения отдельной клетки в дискретном пространстве можно определить ее координатами. При описании связей между клетками считается, что каждая клетка-автомат взаимодействует с соседями. Далее мы будем рассматривать системы на квадратной решетке, при которой клетка имеет четырех соседей.

Конкретизируя вид клеточного автомата, ограничимся рассмотрением однородных детерминированных элементов системы. Однородность в данном случае означает, что все клетки системы равноправны и одинаковы, а функции переходов для всех клеток идентичны. Поскольку входы конкретной клетки, по сути, есть выходы соседей, то можно утверждать, что входными сигналами клетки являются состояния ее соседей. Таким образом, функция перехода для однородного детерминированного клеточного автомата примет вид

$$z_i(t_{k+1}) = \varphi\left(z_i(t_k), \sum_{j \in O(i)} z_j(t_k) \right), \quad (2)$$

где $O(i)$ – множество соседей i-ой клетки

Из выражения (2) видно, что правила эволюции системы клеточных автоматов являются локальными, поскольку состояние каждой конкретной клетки зависит от состояния ближайших соседей, а более удаленные клетки никакого влияния на нее не оказывают.

Общая методология моделирования процессов переноса с использованием клеточных автоматов состоит из следующих этапов [4].

В первую очередь непрерывное модельное пространство разбивается на клетки по функциональному признаку. Основной целью дискретизации пространства является получение функционально однородных клеток. То есть, их размеры должны быть такими, чтобы параметры процессов, протекающих внутри, можно было считать не зависящими от пространственных координат, а единственной независимой переменной останется время.

После дискретизации модельного пространства следует описать поведение полученных клеток с помощью функциональных зависимостей вида (1) – (2).Для этого следует указать явный вид функции φ. Зависимости должны формально связывать состояния клеток и воздействия на них. При этом применяются общие законы конкретного моделируемого процесса.

При моделировании процессов переноса в качестве состояний клеток целесообразно рассматривать интенсивные величины — фазовые переменные потенциального типа, характеризующие соответствующий процесс. Теперь можно использовать одну из форм записи законов сохранения субстанции (энергии, массы). В частности, удобно применять градиентные законы: первый закон Фика для диффузии, закон Фурье для теплопроводности. Если рассматривать удельные (отнесенные к единице объема) потоки субстанции, то в дискретном виде уравнение сохранения запишется так:

$$\frac{\Phi_i(t_{k+1}) - \Phi_i(t_k)}{\Delta t} = \frac{a}{h^2} \sum_{j \in O(i)} \left[\Phi_i(t_k) - \Phi_j(t_k) \right] \tag{3}$$

где: $\Phi_i(t_k)$ – состояние (значение потенциала) i-й клетки на k-м шаге по времени; $\Phi_i(t_{k+1})$ – то же на k+1-м шаге по времени; $\Phi_j(t_k)$ – состояние соседних клеток на k-м шаге по времени; Δt – интервал квантования времени; a – транспортный (кинетический) коэффициент; h – шаг по пространственным координатам.

Поскольку в момент времени t_k произвольная клетка i,j обменивается с соседними клетками потоками субстанции, можно показать, что разность потенциалов взаимодействующих клеток в уравнении (3) пропорциональна суммарному потоку переноса субстанции для рассматриваемой клетки i,j в момент дискретного времени t_k. Эти рассуждения позволяют получить окончательную зависимость функции переходов для отдельной клетки-автомата.

$$\Phi_{i,j}(t_{k+1}) = \Phi_{i,j}(t_k) + \frac{\Delta t}{h^2} \cdot \sum a_{i,j} g_{i,j}(t_k) \tag{4}$$

где $g_{1,j}$ – суммарный поток субстанции в клетку i,j; $a_{i,j}$ – коэффициент, учитывающий свойства материала клетки

Выражение (4) есть общая запись функции переходов, которая позволяет вычислять новое состояние клетки на каждом шаге дискретного времени.

При моделировании реальных процессов в объектах конечных размеров в рассмотрении будут находиться также клетки, имеющие меньшее число соседей – т.е. находящиеся на краях рассматриваемой области. Но получить для них функции перехода вида (4) нетрудно, если использовать описанную выше методику. Таким же образом можно описать поведение краевых клеток, если принять случаи наличия или отсутствия обмена субстанцией с окружающей средой. Наконец, исследуемое пространство может содержать особые клетки, моделирующие локальные источники (стоки) субстанции, т.е. участки объекта, где энергия или масса возникают или поглощаются. Учесть поведение таких клеток можно добавлением в правую часть выражения (4) дополнительного слагаемого, учитывающего удельную мощность источника (стока) потенциала.

Для перехода к моделированию конкретного процесса переноса в уравнения типа (4) следует подставить соответствующие физические величины и транспортные коэффициенты. Так, для тепловых процессов состояние клетки может однозначно определяться температурой. При моделировании диффузионных процессов состояние клетки задается концентрацией целевого компонента. В такой постановке входными внешними воздействиями будут являться соответствующие экстенсивные величины - поток тепла, поток массы. Таким образом, будет получен взаимосвязанный массив клеток, поведение которых во времени (в данном случае дискретном) будет подчиняться законам моделируемого процесса.

После формирования массива клеток и определения законов их функционирования следует задать величины необходимых констант, характеризующих параметры конкретного процесса и исходные состояния клеток. Процесс моделирования будет состоять в определении значений элементов массива для последовательных моментов дискретного времени [5].

Рассмотрим имитацию процесса переноса тепла, осложненного экзотермическими явлениями, в плоской пластине, которая содержит аномальную зону из материала, со

значительно меньшей теплопроводностью по сравнению с основной массой. Было принято, что удельная мощность объемного источника тепла пропорциональна температуре. Модельная пластина была разбита на 1681 (41×41) клеток с шагом 1 мм. Теплофизические характеристики материала: удельная теплоемкость 1000 Дж/(кг·К); плотность 1500 кг/м^3 теплопроводность основного материала 1,5 Вт/(м·К), теплопроводность аномальной зоны 0,015 Вт/(м·К).

В исходном состоянии начальная температура среды и пластины принята равной 0 условных градусов. Величина шага моделирования по времени равнялась 0,005 с. При имитации процесса предполагалось, что теплоотдача в окружающую среду отсутствует. Для инициирования горения центральная точка пластины «поджигалась» мгновенным тепловым импульсом, температура которого превышала исходную температуру пластины.

Результаты моделирования для двух моментов времени представлены на рис. 1. Продолжительность процесса проставлена в правом верхнем углу.

Анализ рис. 1 показывает, что в области воздействия начального импульса образуется своего рода «факел». Такая картина в реальных условиях характерна для начального периода процесса горения. Кроме того, видно, что температура аномального участка резко выделяется на общем неравномерном тепловом поле.

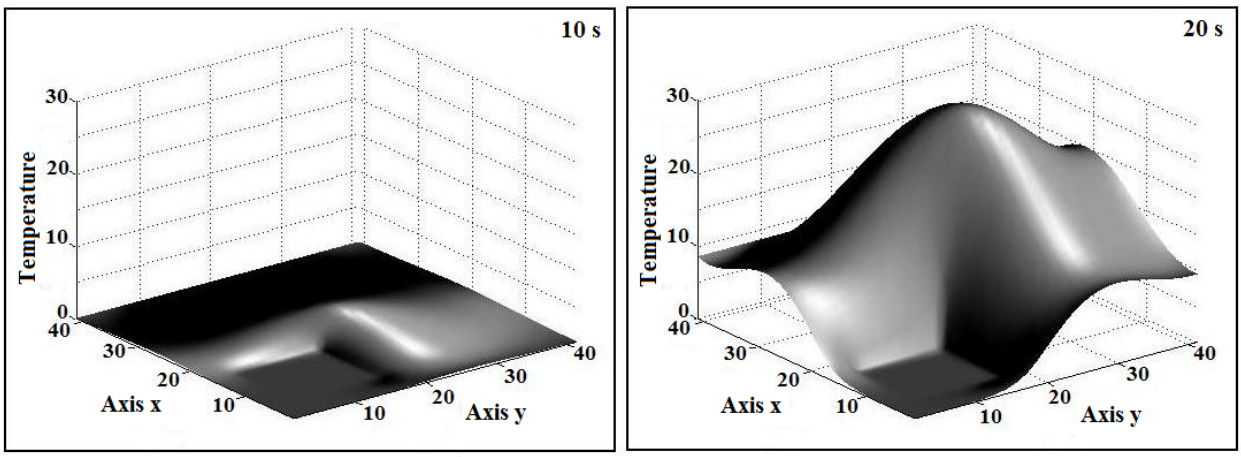


Рисунок 1 — Результаты исследования квазилинейной модели теплопроводности в неоднородной среде.

В качестве второго примера рассмотрим имитацию процесса диффузии в двухмерной пластинке при наличии в ней источника массы, расположенного на одной из границ пластины. При этом пластина содержит своеобразное препятствие - не проводящий вещество участок, с нулевым коэффициентом диффузии, в то время, как коэффициент диффузии остального материала был принят равным 0,1·10-6 м^2/с.

Начальная концентрация вещества в пластине равна 0 условных единиц. Источник массы поддерживал постоянную концентрацию вещества, равную 1 условной единице. В модели предполагалось отсутствие массообмена с окружающей средой. Величина шага моделирования по времени соответствовала 0,2 с. Результаты моделирования представлены на рис. 2.

Рассмотренные примеры иллюстрируют возможности предлагаемого дискретного подхода. Полученные результаты во всех случаях соответствуют общепринятым представлениям о природе и протекании рассмотренных процессов. Следует отметить тот факт, что для имитации, как теплопроводности, так и диффузии, использовался один и тот же программный алгоритм. Этот факт обусловлен физической аналогией процессов, подчиняющихся градиентным законам связи переносимого потенциала и потоков субстанции. Минимальные изменения моделирующей программы при переходе от одного примера к другому можно считать очень ценным преимуществом использования дискретных приемов постановки задач при компьютерном моделировании.

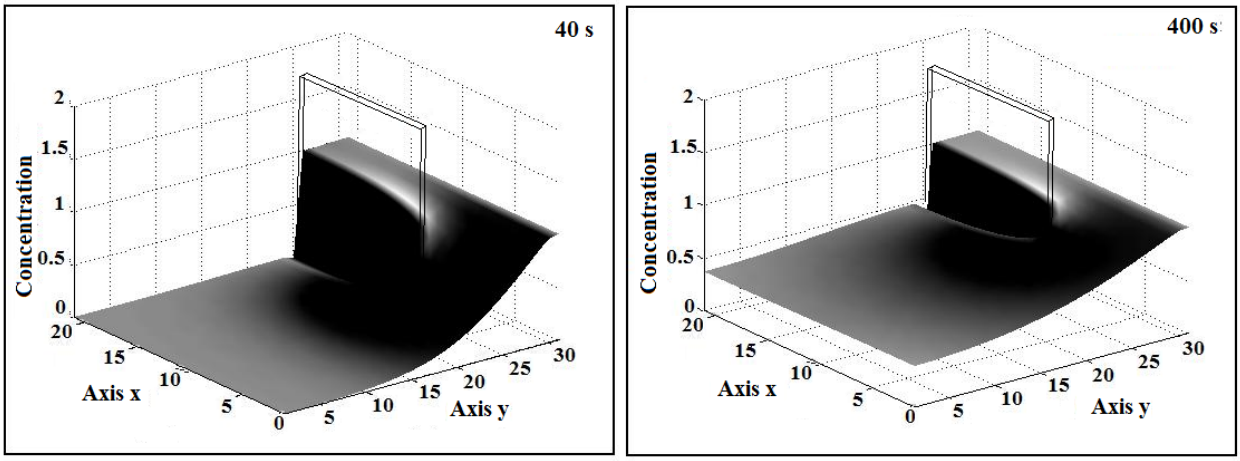


Рисунок 2 — Результаты моделирования диффузии вещества в пластине с препятствием

Выводы

Можно заметить, что описываемый подход позволяет моделировать процессы в объекте, физические свойства которого неоднородны, как в пространстве, так и во времени. В самом деле, характеристики вещества входят в локальную зависимость (4), что уже дает возможность учитывать пространственную неоднородность. Если же свойства материала меняются во времени, или зависят от состояния клетки, то не представляет трудностей учесть эти изменения на каждом шаге по времени. С этих позиций клеточные автоматы можно рассматривать, как некоторую альтернативу классическим уравнениям математической физики.

Использование клеточных автоматов позволяет разбить большую сложную задачу на множество дискретных, мелких задач таким образом, что формулировка задачи для одного элемента одновременно является формулировкой общей задачи. При этом физическая сущность процесса становится предельно понятной и логически правильной. Следует сказать, что данное утверждение справедливо не только для систем клеточных автоматов, но и для большинства других методов исследования, предполагающих дискретизацию пространства по функциональному признаку.

Учитывая стремительный рост возможностей средств компьютерной поддержки клеточные автоматы, в определенном смысле, можно рассматривать как базовые математические модели для исследования процессов переноса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Процессы и аппараты химической технологии. В 5 т. Т. 1. Основы теории процессов химической технологии / Д.А. Баранов, А.В., Вязьмин, А.А. Гухман и др. ; Под. ред. А.М. Кутепова. – М.: Логос, 2000. – 480 с.

2. Тоффоли Т., Марголус Н. Машины клеточных автоматов: пер. с англ. М.: Мир, 1991, 280 с.

3. Бандман О.Л. Дискретное моделирование физико-химических процессов. // Прикладная дискретная математика. №3, 2009, с. 33 – 49.

4. Бобков С.П., Галиаскаров Э.Г. Моделирование процесса теплопроводности с использованием систем клеточных автоматов // Программные продукты и системы. – 2020.- № 4. – с. 641 – 650

5. Бобков С.П., Астраханцева И.А. Особенности использования систем клеточных автоматов при моделировании основных процессов переноса. // «Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение». – 2023. – № 2(74). – С. 49-59.

УДК 004.9: 061.6: 303.732.4: 519.876.5: 661.11 DOI: 10.37816/eeste-2024-1-26-28

ВИРТУАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НАУЧНО-ПРОМЫШЛЕННОГО КЛАСТЕРА МАЛОТОННАЖНОЙ ХИМИИ
VIRTUAL SIMULATION IN THE ACTIVITIES OF SCIENTIFIC AND INDUSTRIALCLUSTERS OF LOW-TONSEN CHEMISTRY

Василий Евгеньевич Трохин*, Аркадий Маркович Бессарабов*, Доминика Андреевна Гришаева *, Александр Алексеевич Клевцов**
Vasiliy E. Trokhin*, Arkadiy M. Bessarabov*, Dominika A. Grishaeva*, Alexander A. Klevtsov**

**АО Научный центр «Малотоннажная химия», Россия, Москва*
**R&D Centre "Fine Chemicals", Russia, Moscow*
(e-mail: trokhin@nc-mtc.ru)
***АО «ЭКОС-1», Россия, Москва*
***JSC "EKOS-1", Russia, Moscow*
(e-mail: klevtsov@ekos-1.ru)

Аннотация: В рамках инновационного развития научно-промышленного комплекса малотоннажной химии проведены работы по созданию цифровых двойников ведущего предприятия малотоннажной химии АО «ЭКОС-1» и одного из ведущих отраслевых институтов малотоннажной химии — АО Научный центр «Малотоннажная химия». На первом этапе разработки создана 3D-модель складского хозяйства «ЭКОС-1» и 3D-модель аналитической лаборатории хроматографического анализа Научного центра.

Abstract: As part of the innovative development of the scientific and industrial complex of low-tonnage chemistry, work was carried out to create digital counterparts of the leading enterprise of low-tonnage chemistry JSC "EKOS-1" and one of the leading industry institutes of low-tonnage chemistry - R&D Centre "Fine Chemicals". At the first stage of development, a 3D model of the EKOS-1 warehouse facility and a 3D model of the analytical laboratory for chromatographic analysis of the Scientific Center were created.

Ключевые слова: цифровой двойник, 3D-модель, малотоннажная химия, научно-промышленный комплекс, аналитическая лаборатория, складское хозяйство.

Keywords: digital twin, 3D model, fine chemicals, scientific and industrial complex, analytical laboratory, warehouse.

Введение

Малотоннажная химия является одной из важнейших подотраслей в структуре химической промышленности [1]. Эффективное развитие малотоннажной химии связано с более тесным объединением науки и производства. Успешным примером такого объединения является совместная работа промышленного предприятия АО «ЭКОС-1» и созданного на его основе Научного центра «Малотоннажная химия». Получившийся научно-производственный кластер (НПК) занял лидирующие позиции на российском рынке химических реактивов и особо чистых веществ [2].

Одно из перспективных направлений инновационного развития и модернизации НПК связано с созданием цифровых двойников (Digital Twins) [3]. Работы проводились по важнейшим элементам, как научной организации, так и промышленного предприятия [4].

Разработка цифрового двойника предприятия АО «ЭКОС-1»

Одним из основных российских производителей материалов реактивной квалификации и особой чистоты является, созданное в 1989 году, промышленное производство АО «ЭКОС-1». За эти годы создана развитая производственная инфраструктура и система логистики.

На первом этапе проведены работы в направление «Складское хозяйство», которому принадлежат 6 складов для сырья и готовой продукции. С применением программного

обеспечения Autodesk Revit [4] были построены 3D-модели складов, а также их внутренняя составляющая (рисунок 1). Все модели максимально похожи на оригинальные объекты. 3D-модели интегрируются в среду разработки Unity 3D для создания виртуального пространства склада, его визуализации, оптимизации логистики и интерактивного взаимодействия с потребителем. Создано новое множество 3D-моделей специального оборудования: погрузчики, стеллажи, коробки, паллеты и др. Для построения экспозиции и рендерных фотографий был использован плагин Enscape. С его помощью проводится перемещение в проекте, создание фотографий, выставление специальных настроек RTX Raytracing и Grass Rendering, создание роликов и виртуального путешествия по складу.



Рисунок 1 — Виртуальное моделирование складского хозяйства.

Виртуальная 3D-модель складского хозяйства позволяет осуществлять более быстрый поиск необходимой информации, минимизирует время складских операций и экономит трудовые ресурсы. Также виртуальная модель используется для маркетинговых работ и позволяет эффектно продвигать, находящуюся на складе готовую продукцию.

Разработка цифрового двойника Научного центра «Малотоннажная химия»

Научный центр «Малотоннажная химия» специализируется на разработках полного цикла: от идеи до внедрения технологических решений на производстве. Специалисты центра занимаются научными разработками для микроэлектроники, фармацевтики, авиационно-космической отрасли и военно-промышленного комплекса. Научный центр разрабатывает инновационные материалы, создает химические композиции и технологии, контролирует качество продукции и проводит аналитические исследования. Исследовательские лаборатории оснащены современными приборами и оборудованием.

На рисунке 2 приведены фотография и 3D-модель здания, в котором находится Научный центр. На последнем 11-м этаже расположены исследовательские подразделения (2D-модель). Их расположение также отражено в 3D-модели. В графической 2D-модели этажа в формате PNG (для печати) отражена планировка - расположение комнат, окон и дверных проемов, а также лифтов. Это помогает точно визуально представить объект. Кроме чертежа введена таблица с распределением помещений (подразделений).

Аналитические лаборатории Научного центра «Малотоннажная химия» совместно с аналитической службой завода АО «ЭКОС-1» осуществляют: разработку общих подходов к анализу реактивов и высокочистых веществ, выбор методов анализа основных групп примесей, разработку оптимальных алгоритмов анализа особо чистых продуктов, сырья для их получения и полупродуктов. В настоящее время разрабатываются информационные 3D-модели лабораторий аналитического отдела, включающие проектную 3D-модель и базы данных по элементам модели. К элементам относятся аналитические приборы и вспомогательное оборудование. На рисунке 3 приведена 3D-модель одного из помещений лаборатории хроматографии.

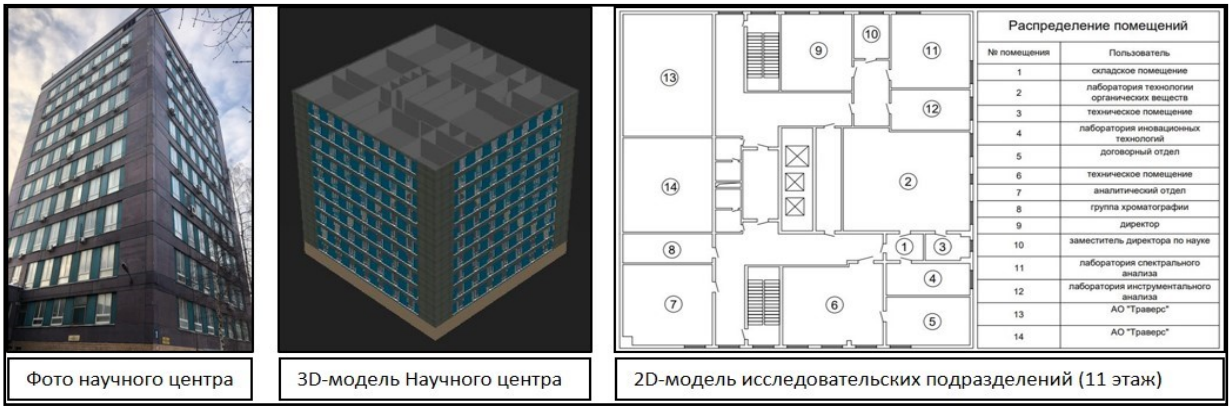


Рисунок 2 — Виртуальная 3D-модель Научного центра «Малотоннажная химия».

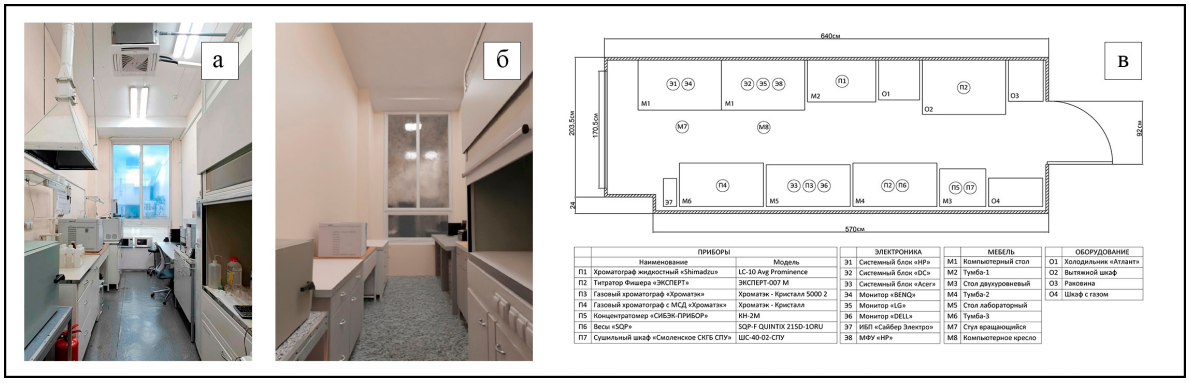


Рисунок 3 — Виртуальная 3D-модель лаборатории хроматографии
(а – фото лаборатории, б – 3D-модель лаборатории, в – 2D план лаборатории).

Системой компьютерной поддержки является Blender (Blender Foundation, Нидерланды). Это мощный профессиональный инструмент, для комплексного 3D моделирования, осуществления анимации сцен и рендеринга визуальных эффектов [3]. Использование данного пакета позволило создать цифровой двойник аналитической лаборатории, который можно использовать для имитации внутренних рабочих процессов.

Выводы

Проведены работы по созданию цифровых двойников ведущего предприятия малотоннажной химии АО «ЭКОС-1» и научной организации - АО Научный центр «Малотоннажная химия». С помощью пакета Autodesk Revit создана 3D-модель складского хозяйства «ЭКОС-1», в которую входит новое множество 3D-моделей специализированного оборудования. На базе системы Blender разработана 3D-модель аналитической лаборатории Научного центра, включающая проектную 3D-модель и базы данных по элементам модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савельева Н.К., Созинова А.А., Ганебных Е.В., Байбакова Т.В. Анализ мирового рынка малотоннажной химии // Индустриальная экономика. 2022. № 3-1. С. 75-84.

2. Бессарабов А.М., Трохин В.Е., Черных Е.Е., Степанова Т.И. Управление информационными ресурсами научно-промышленного комплекса малотоннажной химии // Математические методы в технике и технологиях. 2021. № 9. С. 61-64.

3. Сухомлинов А.И. Интеграция цифровых двойников в промышленные предприятия // Информационные системы и технологии. 2021. № 6 (128). С. 56-64.

4. Bessarabov A., Trokhin V., Mindlin G., Vasilenko V. Virtual model of the production of chemical reagents and highly pure substances // Chemical Engineering Transactions. 2022. V. 94. P. 529-534.

УДК 620.18: 004.4 DOI: 10.37816/eeste-2024-1-29-33

КОМПЬЮТЕРНАЯ ТРИБОМЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ В ОДНОМЕРНОМ ВОЛОКНИСТОМ ПРОДУКТЕ НА БАЗЕ PYTHON
COMPUTER TRIBOMECHANICAL MODEL IN A ONE-DIMENSIONAL FIBER PRODUCT BASED ON PYTHON

Илья Максимович Бурдин, Петр Алексеевич Севостьянов,
Iliya. M. Burdin, Petr A. Sevostyanov

**Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), Россия, Москва*
The Kosygin State University of Russia, Russia, Moscow
(e-mail: burd20@yandex.ru)

Аннотация: Рассмотрены возможности и особенности компьютерного моделирования с применением универсального языка программирования высокого уровня Phyton на примере трибомеханической модели для одномерного волокнистого продукта.

Abstract: The features The possibilities and features of computer modeling using the universal high-level programming language Phyton are considered using the example of a tribomechanical model for a one-dimensional fibrous product.

Ключевые слова: компьютерные модели, язык Phyton, волокнистый материал, трибомеханические модели.

Keywords: computer models, Phyton language, fiber material, tribomechanical models.

Моделирование формы волокон в волокнистых материалах стало неотъемлемой частью исследований в области материаловедения. Это связано с тем, что форма волокон может существенно влиять на механические свойства материалов и их поведение в различных условиях эксплуатации. Для моделирования формы волокон используются различные методы, такие как численное моделирование, экспериментальные исследования и аналитические методы. Они позволяют получить данные о форме волокон и их влиянии на свойства материалов. Численное моделирование представляет собой компьютерное моделирование процессов, происходящих в материалах. Для этого используются различные программные средства, которые позволяют не только смоделировать материал или процесс, но и визуализировать форму волокон и анализировать влияние различных факторов на механические свойства материалов. Эта методика является наиболее точной и дает наиболее подробную информацию о свойствах материалов. Рассмотрим возможности языка Phyton для решения задач моделирования [1]. Этот язык имеет много преимуществ перед другими средствами программирования. Поэтому важно оценить его возможности и в области компьютерного моделирования.

При постановке научных и прикладных задач существенную роль играет поведение волокна при механических деформациях продукта. Для примера рассмотрим одномерный продукт - ленту, ровницу, пряжу. Среди многочисленных задач в области механики задача моделирования волокнистого продукта имеет важную особенность, которая делает ее уникальной и выделяет ее в отдельный класс [2]. Она заключается в том, что волокно в продукте взаимодействует с окружающей его массой других волокон только через силы "сухого" трения, и это взаимодействие имеет статистический характер из-за случайного разброса всех параметров волокна и взаимодействия [3]. Рассмотренная модель является результатом и продолжением исследований в области трибомеханики волокон [2]. В данном случае предлагается модель поведения волокна в одномерном продукте при продольных деформациях.

Приведем основные допущения, принятые в модели. Все перемещения и деформации происходят вдоль оси *X* продукта. Рассматриваемое волокно извито. Поэтому его протяженность *Lp* по оси *X* меньше его длины *L*. Волокно взаимодействует с окружающими его волокнами не по всей своей длине, а на случайном числе *K* участков, которые имеют случайное положение и протяженность *Lk* , *k*=1,...,*K* относительно концов волокна. Напряженность поля сил нормального давления, действующих на участках взаимодействия, и коэффициент трения являются случайными величинами с заданными средними *Nsr*, μ*sr* и коэффициентами вариации *CvN*, *CV*μ. Силы трения описываются законом Амонтона - Кулона. Сила трения направлена в сторону, противоположную смещению участка волокна относительно окружающей его на данном участке массы волокон. [4] Считаем, что волокно находится в образце продукта длиной L_0, зажатого в неподвижный (*A*) и подвижный (*B*) зажимы, с помощью которых образцу придается продольная растягивающая деформация (рис.1). Часть окружающей массы движется в сторону подвижного зажима, другая часть – в сторону неподвижного зажима относительно рассматриваемого волокна. Волокно реагирует на действие приложенных к нему сил трения либо перемещением, либо деформацией растяжения – сжатия вдоль оси *X*, величина которой определяется на участках волокна небольшой протяженности законом Гука с модулем упругости *E* при случайном поперечном сечении волокна S.

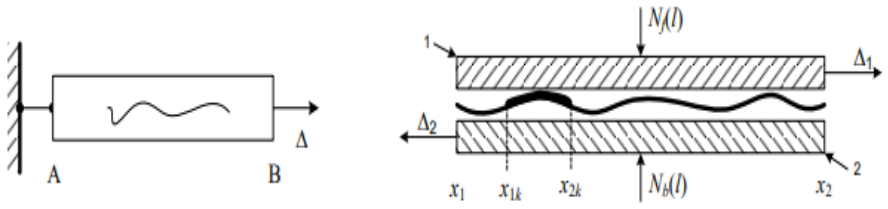


Рисунок 1 — Модель движения и удлинения волокна в поле сил "сухого" трения

Алгоритм, моделирующий движение и растяжение волокна, включает следующие этапы:

1. Генерация значений случайных величин *L, Lp, K, Lk, Nk,* μ*k, Sk*, координат концов *x*1 и *x*2 проекции волокна на *X*, координат концов участков трения *x*1*k* и *x*2*k*, *k*=1,...,*K*.

2. Генерация поля сил нормального давления на участки волокна, расчет максимальной силы трения на участке взаимодействия волокна с окружающими волокнами.

3. Задание перемещения подвижного зажима Δ, растягивающего образец, и пересчет его величины на начальные координаты волокна *x*1 и *x*2.

4. Вычисление величины и направления продольной деформации участков по всей протяженности волокна или их перемещения вдоль оси X с учетом возможного проскальзывания, если силы упругости на участке достигают значения максимальной силы трения.

5. Расчет и накопление в массивах основных характеристик поведения волокна по его протяженности: относительной деформации ε(*x*), смещения *u*(*x*), участков скольжения и растяжения.

Работа алгоритма проверена для одиночного волокна при следующих значениях параметров: *Lpsr* = 30 мм, *Kmax* = 10, *Nsr* = 8·10-2 Н·мм $^{-1}$, μ*sr* = 0,27, Δ = 3 мм, *L*0 =500 мм, *E* = 80000 Н·мм$^{-2}$. Законы распределения используемых случайных величин неизвестны. Поэтому они были выбраны из общих вероятностных представлений и законом (центральной предельной теоремы, закона больших чисел, схемы независимых испытаний и т.п.): для *K* – биномиальное распределение, для *Lp*, *N* и μ – нормальное распределение. Значения коэффициентов вариации принимались в диапазоне от 0,05 до 0,25.

Для получения статистически устойчивых результатов было выполнено *M* = 1000 - кратное повторение прогонов модели. Значения характеристик накапливались в массивах, которые затем были подвергнуты статистической обработке. Разброс величин смещения *u*(*x*) отдельных точек волокна относительно своего исходного положения оказался настолько

незначительным, что 95%-й доверительный интервал для этих смещений на графике практически совпал со средними значениями $u(x)$.

Используя построенную модель, был разработан алгоритм, который позволяет моделировать реакцию волокна во взаимодействии с окружающей его волокнистой массой в одномерном продукте при циклически повторяющихся удлинениях. Эта модель может быть применена для имитации поведения образца в испытательном устройстве во время циклических испытаний [2]. В рамках модели, нагрузка, которая действует на образец, создается путем перемещения подвижного зажима. Нагрузка состоит в циклическом повторении линейного увеличения удлинения на определенную величину Δ с последующей остановкой в течение фиксированного промежутка времени. Циклические нагрузки повторяются, пока не произойдет разрушение образца вследствие прекращения взаимодействия образующих его волокон. На рис.2 приведен график нарастания удлинения $\Delta(t)$ образца во времени, моделируемый в разработанном алгоритме. Это удлинение складывается из обратимой упруго - эластической составляющей $\Delta u(t)$ и необратимой пластической составляющей $\Delta e(t)$. Первая из этих составляющих с ростом продолжительности циклических нагрузок убывает, а вторая нарастает. На нижнем графике приведен в увеличенном масштабе фрагмент этих кривых для первых 10% всего времени испытаний. По оси абсцисс на графиках выводится время в долях от общего времени испытания до разрушения образца. По оси ординат – абсолютное удлинение образца в болях от максимального удлинения, достигаемого при разрушении образца. На рис.3 показана динамика изменения силы сопротивления образца циклическим удлинениям.

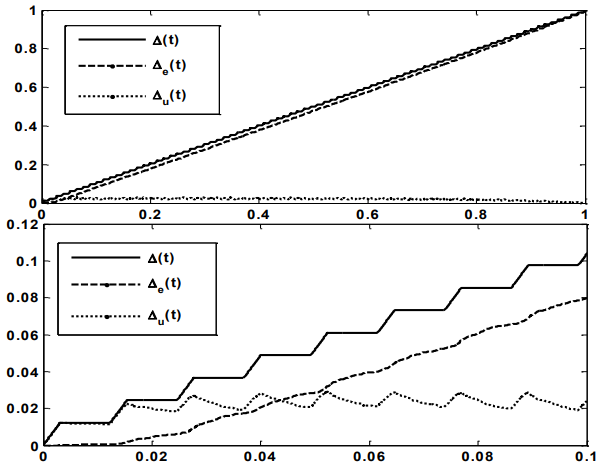


Рисунок 2 — Циклические нагрузки на волокно

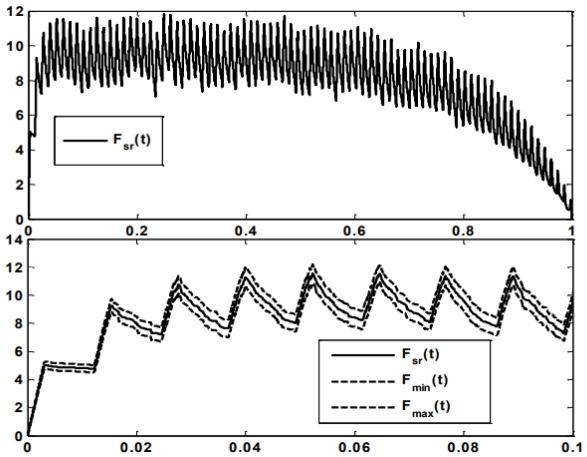


Рисунок 3 — Динамика поведения волокна в поле сил трения

Моделирование процессов поведения волокон является важным аспектом разработки материалов и исследований в области механики. Язык программирования Python предоставляет удобные средства для создания компьютерных моделей, что делает его мощным инструментом для моделирования процессов взаимодействия и поведения волокон. В данной статье рассматривается применение языка Python для создания моделей, анализа и симуляции процессов, связанных с поведением волокон, включая их взаимодействие, механические свойства и деформацию.

Преимущества использования Python при моделировании процессов поведения волокон Python обладает богатым набором библиотек для научных вычислений, таких как NumPy, SciPy, Matplotlib, Pandas и другие. Эти библиотеки обеспечивают удобные инструменты для работы с массивами данных, численных методов, визуализации результатов и анализа данных. Благодаря этому, Python позволяет создавать высокопроизводительные вычислительные модели, а также проводить подробный анализ результатов моделирования.

Создание моделей волоконного материала с использованием Python можно создавать комплексные модели волоконного материала, учитывающие различные аспекты его поведения. Например, с помощью библиотеки NumPy можно моделировать структуру волокон и их взаимодействие, а библиотека SciPy обеспечит инструменты для численного анализа механических характеристик волокон. Кроме того, возможно интегрировать методы конечных элементов для симуляции деформации волоконных материалов.

Анализ механических свойств Python позволяет проводить подробный анализ механических свойств волокон, таких как прочность, упругие модули, усталостная прочность и другие. Используя библиотеки для численного моделирования, можно получать данные о поведении волокон при различных условиях нагружения, что дает возможность оптимизировать дизайн материалов и прогнозировать их поведение в реальных условиях эксплуатации.

Визуализация результатов Python предоставляет возможность создавать высококачественные визуализации данных, что незаменимо при анализе результатов моделирования процессов поведения волокон. С помощью библиотеки Matplotlib и других инструментов можно визуализировать деформации, напряжения, распределение нагрузок и другие характеристики, что способствует более глубокому пониманию поведения волокон.

Для решения научных задач существуют два мощных инструмента Python и MATLAB - для инженерного программирования и моделирования. Рассмотрим некоторые особенности Python, которых нет в MATLAB.

Основные достоинства в том, что Python является свободным и открытым языком программирования, в отличие от MATLAB, который является коммерческим продуктом. Это означает, что Python доступен бесплатно, и исходный код можно изменять и распространять.

Универсальность Python - универсальный язык программирования, который используется в различных областях, включая разработку веб-приложений, анализ данных, машинное обучение, искусственный интеллект, научные вычисления и другие. MATLAB ориентирован в основном на инженерные и научные вычисления.

Библиотеки в Python существует множество библиотек для научных вычислений, таких как NumPy, SciPy, Pandas, Matplotlib, которые обеспечивают богатые функциональные возможности для работы с данными, статистическим анализом, анализом изображений, создания графиков и визуализации также активно используется в области машинного обучения и обработки данных, где есть большое сообщество разработчиков и исследователей.

Скрипты и интерпретатор Python позволяет создавать и выполнять скрипты, что делает его удобным инструментом для автоматизации задач и прототипирования. MATLAB, в свою очередь, также позволяет писать скрипты, но его основное использование связано с инженерными и научными расчетами.

Интеграция с другими языками Python хорошо интегрируется с другими языками, что позволяет использовать его в качестве основного языка для управления и взаимодействия с

другими компонентами программного обеспечения. MATLAB также имеет возможности интеграции, но его основная цель - инженерные и научные вычисления.

Выводы

Созданные компьютерные модели, которые моделируют поведение волокна в одномерном продукте при его удлинении, учитывают нелинейные силы сухого трения и статистическую природу свойств волокна. Полученные статистически стабильные оценки параметров описывают изменение формы волокна и взаимодействие с окружающими волокнистыми материалами. Использование моделей позволило имитировать динамику удлинения образца продукта при циклических удлинениях до полного разрушения, то есть учесть эффект усталостной прочности волокнистого материала.

Для разработки программы использовались несколько библиотек. Библиотека для Pyton Matplotlib позволила наглядно вывести график моделирующий искривление волокнистых материалов. Таким образом, можно считать, что Python успешно справляется с задачами, связанными с моделированием трибомеханических моделей волокон: он имеет большое количество возможностей, которые избавляют разработчика и пользователя модели от рутинных операций и позволяют сконцентрироваться на решение конкретной задачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Эрик М. Изучаем Python. Программирование игр, визуализация данных, веб-приложения. 2-е изд. – " Издательский дом"" Питер""", 2017.

2. Севостьянов П. А. Динамика и модели основных процессов прядения. Том. Часть I. Рыхление, очистка, смешивание, кардо-и гребнечесание //Монография.-М.: ФГБОУ ВО" РГУ им. АН Косыгина".–2020.–264 с. – 2020.

3. Рашкован И.Г. Методы оценки распределения волокон по поперечным сечениям пряжи. – М.: Легкая индустрия, 1970г. - 200с.

4. Зубчанинов В.Г. Основы теории упругости и пластичности: Учебн. для вузов. – М.: Высшая школа, 1990. – 368 с.: ил.

УДК 620.18: 004.4 DOI: 10.37816/eeste-2024-1-33-37

ПРИМЕНЕНИЕ УРАВНЕНИЯ БОЛЬЦМАНА ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЯЧЕЕЧНЫХ МОДЕЛЕЙ
APPLICATION OF THE BOLZMANN EQUATION TO IDENTIFY CELL MODELS

Владимир Павлович Жуков, Антон Николаевич Беляков,
Илья Дмитриевич Аксаковский
Vladimir P Zhukov*, Anton N. Belyakov*, Ilya D. Aksakovskiy*

Ивановский государственный энергетический университет
имени В.И. Ленина, Россия, Иваново
Ivanovo State Power Engineering University, Russia, Ivanovo
(e-mail: zhukov-home@yandex.ru)

Аннотация: Разработан метод идентификации ячеечных моделей реактора кипящего слоя с использованием данных, полученных на основе решения моделей более высокого иерархического уровня –дискретных моделей уравнения Больцмана, выполнена проверка адекватности идентифицированной модели реактора кипящего слоя.

Abstract: A method for identifying cell models of a fluidized bed reactor has been developed using data obtained on the basis of solving discrete models of the Boltzmann equation, and the adequacy of the identified model of a fluidized bed reactor has been verified.

Ключевые слова: идентификация, модель, цепь Маркова, уравнение Больцмана, реактор кипящего слоя

Keywords: identification, model, Markov chain, Boltzmann equation, fluidized bed reactor.

Ячеечные модели, построенные на основе теории цепей Маркова, в силу их универсальности и простоты реализации расчетных алгоритмов широко используются для описания различных технологических процессов в химической, строительной и энергетической отраслях промышленности [1-4]. Известны модели на основе теории цепей Маркова реакторов кипящего слоя [1-4], в которых реализуются процессы смешивания, классификации, измельчения, сушки, тепломассообмена. При этом в качестве параметров идентификации модели используются приведенные коэффициенты макродиффузии и скорости конвективного переноса материала. Данные коэффициенты зависят от целого ряда технологических параметров, для определения которых требуется проведение дополнительных экспериментальных исследований или привлечение экспериментальных данных из литературных источников. Модели более высокого иерархического уровня, в которых для получения конечных результатов используются в основном справочные данные, позволяют существенно снизить объем необходимых экспериментальных исследований для идентификации и верификации модели. Однако такие модели требуют более высокой квалификации разработчиков и пользователей, а также существенно больших вычислительных ресурсов. Очевидно, что существует оптимальное соотношение вычислительных и экспериментальных ресурсов, которое позволяет обеспечить получение заданной точности результатов. Разработка таких расчетных методов, в которых оптимально сочетаются простота построения модели и точность получаемых результатов, является актуальной задачей научных исследований.

Предлагается для определения параметров идентификации ячеечной модели, построенной в рамках теории цепей Маркова, использовать результаты, полученные с помощью дискретной модели уравнения Больцмана, которая по мнению А.А. Самарского [5] относится к более высокому иерархическому уровню моделей.

В качестве объекта моделирования выбирается цилиндрический реактор кипящего слоя. Предмет исследования – получение расчетным путем параметров, необходимых для проведения технологических расчетов с использованием ячеечных моделей на основе теории цепей Маркова. Целью исследования является разработка методов расчета технологических процессов, эффективно сочетающих простоту и качество математического описания.

Рассматривается периодический процесс в цилиндрическом реакторе кипящего слоя. Находясь во взвешенном состоянии, сыпучий материал в зависимости от назначения реактора участвует в перемешивании, измельчении, классификации, сушке, тепломассообмене или в других технологических процессах [1-4]. Кинетика перечисленных технологических процессов, протекающих в реакторе, определяется совокупностью ряда параметров, к наиболее важным из которых относятся время пребывания материала в реакторе, загрузка реактора, распределение материала по высоте аппарата. В предлагаемом исследовании последовательно решаются две задачи: 1) в рамках дискретных аналогов уравнения Больцмана [6] строится модель распределения материала по высоте реактора кипящего слоя и проверяется ее адекватность; 2) в рамках модели уравнения Больцмана определяются параметры, необходимые для проведения технологических расчетов с помощью модели на основе теории цепей Маркова.

При построении модели процесса в рамках дискретных моделей уравнения Больцмана [6] в общем случае фазовое пространство может включать три пространственные координаты и соответственно три проекции скорости вдоль этих координат. Для описания цилиндрического реактора кипящего слоя используется одна пространственная координата x, скорость вдоль этой координаты v и координата крупности частиц δ. Расчетная схема модели представлена на рис.1,а. Для решения уравнения Больцмана [6] разработаны метод решения, алгоритм и программное обеспечение, на которое получено свидетельство о регистрации программного продукта [7]. Для численного решения уравнения Больцмана применительно к реактору кипящего слоя искомая плотность распределения вещества по ячейкам фазового пространства, представленном на рис.1,а, описывается вектором $\mathbf{F}=\{f_i\}$, где индекс i соответствует номеру ячейки.

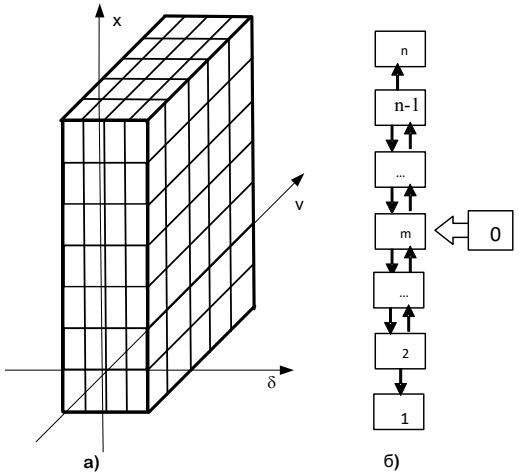


Рисунок 1 — Расчетное фазовое пространство реактора кипящего для дискретных моделей уравнения Больцмана (а), расчетная схема модели на основе теории цепей Маркова (б)

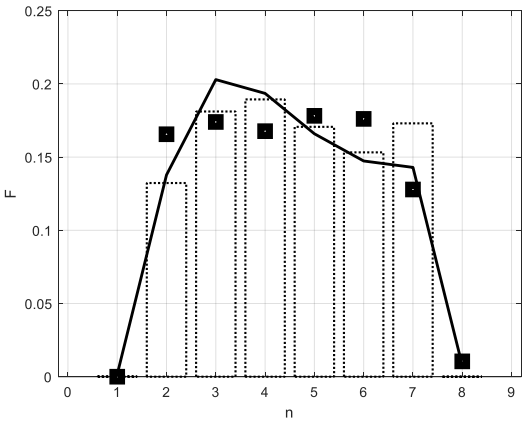


Рисунок 2 — Сопоставление результатов расчета по модели Больцмана (сплошная линии), по модели на основе теории цепей Маркова (пунктирная столбчатая диаграмма) с экспериментом (точки)

Сначала для каждой ячейки фазового пространства определяются номера ячеек, с которыми она может взаимодействовать. Затем составляются уравнения балансов вещества и энергии и определяются потоки вещества и энергии между этими ячейками. Известные потоки позволяют определить вероятности переходов (p_{ij}) за рассматриваемый промежуток времени Δt. Указывая для каждой ячейки адреса ячеек, в которые возможен переход, и вероятности этих переходов, определяется состояние системы в следующий момент времени. Следует отметить, что трехмерное расчетное фазовое пространство рис.1,а при проведении расчета преобразуется в одномерное распределение согласно правилам, представленным в [7]. Расчет искомого распределения **F** в произвольные моменты времени (k_1) выполняется согласно выражению

$$\left(\mathbf{F}^{1B}\right)_i^{k_1} = \sum_j p_{ij}^{1B} \left(\mathbf{F}^{1B}\right)_j^{k_1-1}, \quad (1)$$

где верхний индекс «1В» относится к параметрам модели Больцмана в одномерном представлении функции распределения. Тестирование метода решения уравнения Больцмана, алгоритма и компьютерной программы, проведенное при решении задачи движения ансамбля частиц [8], показало хорошее совпадение результатов численного и аналитического решений.

Описанный подход (1) используется далее для решения задачи распределения частиц сыпучего материала по высоте реактора кипящего слоя. Результаты расчета приводятся на рис. 2 в виде зависимости распределения частиц по высоте кипящего слоя для случая одинаковой крупности зерен исходного порошка. Экспериментальные данные получены на лабораторной установке реактора кипящего слоя при загрузке в реактор сферических частиц одинакового размера [9].

Для описания распределения частиц в реакторе в рамках теории цепей Маркова необходимые для расчета параметры модели предлагается определить в ходе расчета в рамках дискретных моделей уравнения Больцмана. Основные расчетные соотношения для реактора кипящего слоя, работающего в периодическом режиме, записываются согласно [1] и расчетной схемы рис.1,б. Для модели процесса, построенной в рамках теории цепей Маркова, традиционно используется описание текущего состояние процесса в виде вектора-столбца **F**, состоящем из масс материала в каждой ячейке, а его эволюция – матричным равенством

$$\left(\mathbf{F}^{M}\right)^{k_1} = P^{M}\left(\left(\mathbf{F}^{M}\right)^{k_1-1} + \left(\mathbf{F}^{M}\right)_S^{k_1-1}\right), \quad (2)$$

где k_1 – номер перехода, $\left(\mathbf{F}^{M}\right)_{s}^{k_1-1}$ – вектор подачи исходного материала (его масса, поступающая в реактор на каждом переходе), P^{M} – матрица переходных вероятностей – трехдиагональная матрица размером n×n, в каждом столбце которой размещены вероятности для материала в данной ячейке перейти вниз, остаться и перейти вверх, соответственно. Эти вероятности выражаются через безразмерный коэффициент диффузионного переноса *d*, характеризующий действие на частицы случайных факторов, и безразмерную скорость движения частиц фракции v_k . Найденное решение уравнений (1) в рамках модели Больцмана позволяет определить параметры идентификации для модели Маркова согласно следующих выражений

$$\left[p_v^{1M}\right]_{k_2}=\frac{1}{N}\left[\sum_{i..j}p_v^{3B}\right]_{k_2},\ \left[p_n^{1M}\right]_{k_2}=\frac{1}{N}\left[\sum_{i..j}p_n^{3B}\right]_{k_2},\ \left[d_n^{1M}\right]_{k_2}=\left[p_n^{1M}\right]_{k_2},\ \left[v_k^{1M}\right]_{k_2}=\left[p_v^{1M}\right]_{k_2}-\left[d_n^{1M}\right]_{k_2}, \qquad (3)$$

где N — параметр нормировки, нижний индекс «n» соответствует вероятностям частиц двигаться вниз, нижний индекс «v» – двигаться вверх реактора, индекс «$к_2$» показывает номер ячейки. Найденные согласно (3) параметры идентификации модели Маркова оказались разными для разных ячеек: v_k=[0.0833 0.0245 0.0202 0.0207 0.0225 0.0237 0.0240], d =[0 0.0333 0.0301 0.0305 0.0318 0.0328 0.0331]. На рис. 2 приведено сопоставление результатов расчета по модели Больцмана с результатами расчетов, выполненных в рамках идентифицированной модели Маркова, и с экспериментальными значениями, полученными на лабораторной установке. Анализ приведенных результатов показывает, что найденные параметры идентификации для модели на основе теории цепей Маркова удовлетворительно описывают распределение материала по высоте реактора и могут быть в дальнейшем использованы для расчетного анализа совмещенных процессов в реакторе кипящего слоя: измельчения, классификации, сушки, тепломассообмена и т.д.

Выводы

Разработан метод идентификации ячеечной модели реактора кипящего слоя с использованием данных, полученных на основе решения дискретных моделей уравнения Больцмана, выполнена проверка адекватности идентифицированной модели реактора кипящего слоя. Представлен подход к разработке расчетного обеспечения ячеечной модели, построенной на основе теории цепей Маркова. Анализ полученных результатов показал адекватное описание процессов в реакторах кипящего слоя ячеечными моделями, построенными на основе теории цепей Маркова и идентифицированными на основе результатов, полученных в рамках дискретных моделей уравнения Больцмана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mizonov V.E. et al. Application of multi-dimensional Markov chains to model kinetics of grinding with internal classification, Albi/ Int. J. Miner. Process. 74S (2004) S307–S315.

2. Огурцов А.В. и др. Моделирование истирания частиц в кипящем слое на основе теории цепей Маркова // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2003. Т. 46, № 7. С. 64-66.

3. Berthiaux H. et al Application of the Theory of Markov Chains to Model Different Processes in Particle Technology // Powder Technology. 2005. Vol. 157, No 1–3. pp. 128–137.

4. Алоян Р.М., Федосов С.В., Мизонов В. Е. Теоретические основы математического моделирования механических и тепловых процессов в производстве строительных материалов. Иваново: ИГАСУ, 2011. 255 с.

5. Самарский А. А. Математическое моделирование: Идеи. Методы. М.: Физматлит, 2001. 320 с.

6. Жуков В.П., Беляков А.Н. Моделирование совмещенных гетерогенных процессов на основе дискретных моделей уравнения Больцмана //Теоретические основы химической технологии. 2017. том 51, № 1, С. 78–84.

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Расчет многомерных совмещенных процессов измельчения, классификации в сыпучих средах» №

2010612671 от 19 апреля 2010 года. Авторы: Беляков А.Н., Жуков В.П., Власюк А.А., Барочкин А. Е.

8. Жуков В.П. и др. Анализ и совершенствование методов решения дискретных моделей уравнения Больцмана // Вестник ИГЭУ. 2021. №. 6. С. 62-69.

9. Mizonov V.E. et al. (2014) Modeling of Particle Concentration Distribution in a Fluidized Bed by Means of the Theory of Markov Chains // Particulate Science and Technology, 2014. 32:2. pp.171-178.

УДК 66.011 DOI: 10.37816/eeste-2024-1-37-40

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПОИСКА СПОСОБОВ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В ПРОЦЕССАХ РЕКТИФИКАЦИИ
THEORETICAL RATIONALE FOR SEARCHING FOR WAYS TO SAVE ENERGY IN RECTIFICATION PROCESSES

Михаил Константинович Захаров, Евгений Андреевич Губкин, Денис Борисович Плетнев
Mikhail K. Zakharov, Evgeniy A. Gubkin, Denis B. Pletnev

МИРЭА - Российский технологический университет, Институт тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова, Россия, Москва
MIREA - Russian Technological University, Institute of Fine Chemical Technologies named after M.V. Lomonosov, Russia, Moscow
(e-mail: mkzakharov@gmail.com, ugeakon@yandex.ru, pletnewdb@yandex.ru)

Аннотация: На основе теории внутреннего энергосбережения в процессе ректификации разработаны способы снижения затрат теплоты в кипятильнике, обеспечивающем паровой поток по колонне. Предложены формулы для количественной оценки внутреннего энергосбережения в ректификационных колоннах, которое зависит от флегмового числа и доли тарелок в отгонной части колонны. Теоретически обоснован выбор оптимальной схемы разделения трехкомпонентной смеси.

Abstract: Based on the theory of internal energy saving in the rectification process, methods have been developed to reduce heat costs in the boiler, which provides steam flow through the column. Formulas are proposed for quantitative assessment of internal energy saving in distillation columns, which depends on the reflux ratio and the proportion of trays in the stripping part of the column. The choice of the optimal scheme for separating a three-component mixture is theoretically justified.

Ключевые слова: ректификация, бинарные смеси, трехкомпонентные смеси, паровой поток, внутреннее энергосбережение, флегмовое число

Keywords: rectification, binary mixtures, three-component mixtures, steam flow, internal energy saving, reflux ratio

Для уменьшения затрат теплоты при разделении жидких смесей методом ректификации применяют различные способы энергосбережения [1–3]. Проведенный нами [4–6] сравнительный анализ всех существующих и предлагаемых новых способов энергосбережения [7] позволил выявить наилучшие с помощью теории внутреннего энергосбережения.

Сущность внутреннего энергосбережения заключается в следующем. На тарелку поступает насыщенный пар, имеющий температуру выше, чем жидкость на тарелке. Поэтому происходит его парциальная конденсация до температуры жидкости на тарелке, которая устанавливается в соответствии с балансовым смешением парового потока с нижележащей тарелки и жидкостного потока с вышерасположенной тарелки. При непрерывной работе

колонны находящаяся на тарелке жидкость не изменяет своих характеристик (состава, температуры), а лишь обеспечивает необходимую поверхность контакта между встречающимися на тарелке паровым и жидкостным потоками. Теплота, которая выделяется при конденсации пара, расходуется на испарение поступающей сверху на тарелку жидкости при температуре жидкости на тарелке. Вновь образовавшийся пар, обогащённый низкокипящим компонентом, поступает на следующую тарелку. И вновь частично конденсируется. Так процесс повторяется многократно (по числу тарелок в колонне). Чем большая доля парового потока конденсируется (это зависит от потока флегмы) на каждой тарелке, тем более энергосберегающим становится процесс разделения методом ректификации. На тарелках отгонной секции колонны поток жидкости больше парового потока, поэтому весь паровой поток конденсируется.

Для количественной оценки величины внутреннего энергосбережения (степени использования парового потока) при подаче в колонну исходной смеси при температуре кипения применима следующая формула:

$$\text{Эн} = \frac{R}{R+1}\frac{n_y}{n_y + n_o} + \frac{n_o}{n_y + n_o} \quad (1)$$

где Эн — внутреннее энергосбережение; R – флегмовое число; n_y, n_o – число тарелок в укрепляющей и отгонной частях колонны.

Согласно формуле (1) при небольших флегмовых числах R величина внутреннего энергосбережения в большей степени определяется долей тарелок в отгонной секции колонны. Это подтверждается на примере разделения смеси бензол-толуол разных составов (два варианта) с получением одного из продуктов разделения чистотой 0,98 мол. дол., а второй продукт разделения – эквимолярного состава [5]. Содержание бензола 0,74 мол. дол. в исходной смеси – вариант 1, содержание в исходной смеси толуола 0,74 мол. дол. (бензола – 0,26) – вариант 2. Производительность колонн по исходной смеси в обоих случаях принята равной 0,01 кмоль/с. Коэффициент избытка флегмы $\sigma = 1{,}1$.

Расчет числа теоретических тарелок в колонне выполнен в диаграмме $y - x$. На рисунке 1 представлена качественная картина этого определения числа тарелок в колонне. Результаты расчета представлены в таблице 1.

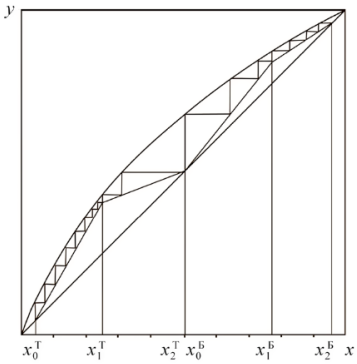


Рисунок 1 — К определению числа теоретических тарелок в диаграмме $y - x$.

В таблице видно, что при флегмовых числах меньше единицы согласно формуле (1) в этом случае основной вклад во внутреннее энергосбережение вносит второе слагаемое (доля тарелок в отгонной секции полной колонны).

Проведенный анализ затрат теплоты от внутреннего энергосбережения при разделении бинарной смеси позволяет теоретически обосновать выбор оптимальной (по затратам теплоты) схемы разделения многокомпонентных смесей.

Рассмотрим это на примере разделения трехкомпонентной смеси: бензол (Б) – толуол (Т) – этилбензол (ЭБ). Разделение трехкомпонентных смесей в двух колоннах возможно в двух вариантах:

а – в первой колонне верхний продукт – бензол;

б – в первой колонне нижний продукт – этилбензол.

В обоих вариантах во вторых колоннах разделяются бинарные смеси.

Таблица 1 — Сравнение результатов расчета двух вариантов разделения смеси бензол-толуол.

Параметры	Вариант 1			Вариант 2		
	x_0	x_1	x_2	x_0	x_1	x_2
	0,50	0,74	0,98	0,02	0,26	0,50
Число теоретических тарелок в укрепляющей секции, n_y	12,9			4,1		
Число теоретических тарелок в отгонной секции, n_o	3,2			15,2		
Флегмовое число, R	0,857			0,208		
Затраты теплоты в кипятильнике, $Q_К$	283			210		
Внутреннее энергосбережение, Эн	0,569			0,824		

При расчете величины внутреннего энергосбережения при разделении трехкомпонентной смеси в двух колоннах следует учитывать величины паровых потоков в каждой колонне:

$$Эн = Эн_1 \frac{V_1}{V_1 + V_2} + Эн_2 \frac{V_2}{V_1 + V_2} \quad (2)$$

где $Эн_1, Эн_2$ — внутреннее энергосбережение в 1-ой и 2-ой колоннах; V_1, V_2 — паровые потоки в 1-ой и 2-ой колоннах.

Как правило, при разделении трехкомпонентной смеси нужно добиться большего внутреннего энергосбережения в первой колонне. Тогда и среднее внутреннее энергосбережение в двух колоннах будет большим.

Анализ удобно провести в треугольной диаграмме (рисунок 2), разделенной на две области: *а* и *б*. Вычислительным экспериментом [8] было доказано, что при разделении исходных смесей составов, расположенных в верхней области *а* затраты теплоты меньше в схеме варианта *а*, чем в варианте *б*. И наоборот, при разделении исходных смесей составов, расположенных в нижней области *б* затраты теплоты меньше, чем в варианте *а.*

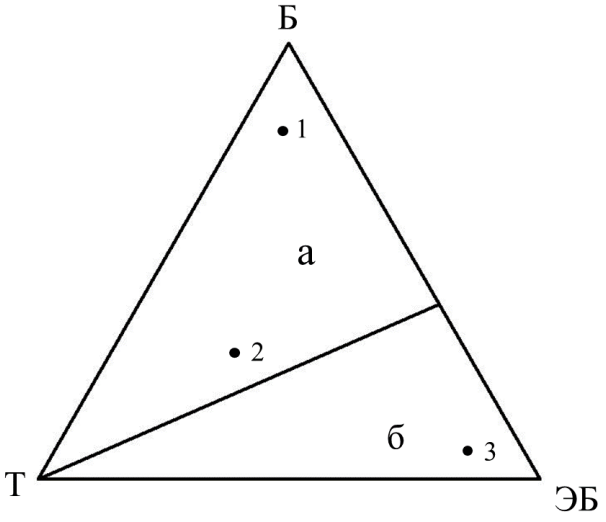


Рисунок 2 — Составы исходных трехкомпонентных смесей.

Теория внутреннего энергосбережения объясняет это. При разделении трехкомпонентной смеси с большой концентрацией бензола (Б) (точка 1 на рис. 2) минимальное флегмовое число небольшое, но доля тарелок в отгонной части велика. Согласно

формуле (1), внутреннее энергосбережение в первой колонне будет большим за счет большего второго слагаемого. А значит, затраты теплоты меньше.

Пусть точке 2 бензола 25 %. При разделении по варианту «а» бензол надо отделить от толуола и этилбензола в первой колонне. Если считать смесь бинарной (по правилу Львова [9]) – это 25% бензола и 75% толуола (вместе с этилбензолом). Это потребует большое флегмовое число, и внутреннее энергосбережение будет больше за счет первого слагаемого в формуле (1).

При малых содержаниях бензола и толуола в исходной смеси (точка 3) можно так же считать, что в первой колонне будет разделяться смесь толуол (и бензола вместе с ним) - этилбензол (с содержанием этилбензола около 90%). Здесь при малой концентрации НКК в исходной смеси флегмовое число будет большое, и, следовательно, внутреннее энергосбережение тоже. При этом затраты теплоты малы.

Выводы

Теоретически доказано существование двух областей в треугольнике составов, в каждой из которых положение точки состава исходной трехкомпонентной смеси обеспечивает выбор схемы разделения с минимальными затратами.

Аналогичный подход применим к выбору наилучшей схемы разделения многокомпонентных смесей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Захаров М.К.* Энергосберегающая ректификация: учебное пособие. СПб.: Лань, 2018. 252 с.

2. *Kim Y.H.* Design and control of energy-efficient distillation columns. // Korea J. Chem. Eng. 2016. V. 33. P. 2513 – 2521.

3. *Тимошенко А.В., Анохина Е.А.* Энергосберегающая ректификация многокомпонентных смесей в сложных колоннах с боковыми отборами // Хим. пром. 2002. №5. С. 3 – 6.

4. *Захаров М.К., Писаренко Ю.А., Сычева О.И.* Сравнение способов энергосбережения при ректификации жидких смесей // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2021. Т. 64. № 1. С. 85 – 92.

5. *Захаров М.К., Егоров А.В., Подметенный А.А.* Разделение жидких смесей и затраты теплоты при ректификации // Тонкие химические технологии. 2021. Т. 16. № 1. С. 7.

6. *Захаров М.К., Носов Г.А., Писаренко Ю.А., Жильцова Л.М., Швец А.А.* Сравнение распределенного подвода теплоты по высоте ректификационных колонн с традиционным // Теоретические основы химической технологии. 2017. Т. 51. № 5. С. 560 – 568.

7. *Захаров М.К.* Сравнение способов энергосбережения, базирующихся на различных теориях: обратимой ректификации и внутреннего энергосбережения в колоннах // Теоретические основы химической технологии. 2022. Т. 56. № 6. С. 760 – 768.

8. *Корабельников М.М.* Синтез и анализ технологических схем ректификации многокомпонентных зеотропных смесей: дисс. … канд. техн. наук. М.: МИТХТ им. М.В. Ломоносова, 1978. 110 с.

9. *Львов С.В.* Некоторые вопросы ректификации бинарных и многокомпонентных смесей // М.: Издательство АН СССР, 1960. 163 с.

УДК 66.011 DOI: 10.37816/eeste-2024-1-41-44

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ДЛЯ РАСЧЕТА ТРУБНОГО ТЕЧЕНИЯ С ВЫСОКИМ ЧИСЛОМ РЕЙНОЛЬДСА
APPLICATION OF TURBULENCE MODELS FOR CALCULATION HIGH REYNOLDS NUMBER PIPE FLOW

Александр Сергеевич Белоусов, Денис Александрович Овсянников
Alexander S. Belousov, Denis A. Ovsyannikov

Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), Россия, Москва
The Kosygin State University of Russia, Russia, Moscow
e-mail: (as.belousov-2@yandex.ru)

Аннотация: Выполнено исследование применения систем вычислительной гидродинамики для точного прогнозирования затрат энергии для внутреннего турбулентного течения. Проведена верификация моделей турбулентности для трубного течения с высоким числом критерия Рейнольдса.

Abstract: A study was carried out on the use of computational fluid dynamics systems to accurately predict the energy consumption of internal turbulent flow. Verification of turbulence models for pipe flow with a high Reynolds number was carried out.

Ключевые слова: вычислительная гидродинамика, модели турбулентности, верификация, трубные течения.

*Keyword*s: computational fluid dynamics, turbulence models, verification, pipe flows.

Для исследований и разработок нового оборудования по процессам и аппаратам химической технологии в ближайшие годы можно ожидать возрастания использования систем вычислительной гидродинамики (CFD - Computational Fluid Dynamics) [1-4]. Вместе с тем в последние десятилетия наметилась тенденция к увеличению числа проверок (верификации и валидации) применимости этих систем для конкретных прикладных задач [2-3]. По базе данных Elsevier нами проведен анализ динамики публикаций исследований с применением CFD в области «chemical engineering», которые используют в той или иной мере проверку расчетов. Как видно из результатов анализа, представленных в таблице 1, удельный вес работ с применением проверок расчетов CFD в последние десятилетия значительно вырос.

Таблица 1 – Статьи по CFD с проверкой расчетов (в % к общему числу статей по CFD в области chemical engineering).

Годы	1996-2000	2001-2005	2006-2010	2011-2015	2016-2020	2021	2022	2023 (9 мес.)
Статьи с проверкой (%)	24	31,3	31,4	34,0	39,9	44,8	49,3	50,8

В России за все годы, включая 2023 г., по данным Elibrary.ru удельный вес публикаций по CFD с проверкой расчетов был в диапазоне 15-17 %.

Другая тенденция, важная для расчетов с помощью CFD турбулентных течений в процессах и аппаратах химической технологии, наметилась в последние годы. Тенденция заключается во все более возрастающей ответственности за качество расчетов у самих исследователей в прикладных областях. Действительно, с одной стороны предполагается, что технологии CFD должны в полной мере описывать гидродинамику, массообмен и даже химические реакции в пространственных течениях для различных конструкций [1,5]. С другой стороны системы CFD содержат десятки вариантов различных моделей турбулентности, то

есть выбор модели ложится на пользователя. Также пользователю предлагается, с учетом специфики объекта моделирования, самостоятельно подбирать коэффициенты моделей [6]. Таким образом, пользователь-прикладник по сути должен сам исследовать особенности турбулентности в своем аппарате, уметь самостоятельно подбирать модель турбулентности, обеспечивающую приемлемое качество прогноза. В авиакосмической отрасли [2] работы по верификации моделей турбулентности проводятся, в основном, для задач внешнего гидродинамического течения, предварительно на простых, но характерных объектах (идеализированные канонические геометрии). При этом чаще всего исследуются локальные характеристики, их обычно проще измерять. В случае же процессов и аппаратов химической технологии, наоборот, более характерны внутренние ограниченные течения, а исследователя в первую очередь интересуют интегральные характеристики аппарата.

В данной работе для проверки качества моделирования предложена сравнительная оценка точности группы моделей турбулентности для течения в трубе при высоком числе Рейнольдса (200000), на основе типовой интегральной характеристики – затрат энергии на прокачку. Рассматривается основной характерный участок течения: установившееся течение. Для исследования приняты наиболее экономичные группы моделей турбулентности, основанные на методике RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes) – уравнения Навье-Стокса, осредненные по Рейнольдсу.

Двухпараметрическая *k-ε* модель, выражает турбулентные напряжения в уравнениях Рейнольдса на основе дифференциальных уравнений для двух параметров: кинетической энергии турбулентности k и диссипации турбулентности ε:

$$\begin{cases} U\dfrac{\partial k}{\partial x}+V\dfrac{\partial k}{\partial y}+W\dfrac{\partial k}{\partial z}=\dfrac{\partial}{\partial y}\left(\dfrac{\partial k}{\partial y}\cdot\dfrac{\nu_t}{\sigma_k}\right)+\dfrac{\partial}{\partial z}\left(\dfrac{\partial k}{\partial z}\cdot\dfrac{\nu_t}{\sigma_k}\right)+G-\varepsilon \\ U\dfrac{\partial \varepsilon}{\partial x}+V\dfrac{\partial \varepsilon}{\partial y}+W\dfrac{\partial \varepsilon}{\partial z}=\dfrac{\partial}{\partial y}\left(\dfrac{\partial \varepsilon}{\partial y}\cdot\dfrac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)+\dfrac{\partial}{\partial z}\left(\dfrac{\partial \varepsilon}{\partial z}\cdot\dfrac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)+c_1\cdot\varepsilon/k\cdot G-c_2\cdot\varepsilon^2/k \end{cases} \quad (1)$$

$$G=\nu_t\cdot\left[\left(\frac{\partial U}{\partial y}\right)^2+\left(\frac{\partial U}{\partial z}\right)^2\right] \quad (2)$$

где G — описывает генерацию кинетической энергии турбулентности, c_1, c_2 - дополнительные параметры [5]. Поскольку модель *k-ε* недостаточно точно учитывает вращение потоков, или изогнутость труб, рассматривались также *k-ε*-модель RNG (Re-Normalization Group) и реализуемая *k-ε*-модель [5]. Эти модели расширяют применение модели *k-ε* на области с вращением потока. Модель RNG может быть представлена в виде:

$$\begin{cases} U\dfrac{\partial K_t}{\partial x}+V\dfrac{\partial K_t}{\partial y}+W\dfrac{\partial K_t}{\partial z}=\dfrac{\partial}{\partial y}\left(\dfrac{\partial K_t}{\partial y}\cdot\dfrac{\nu_t}{\sigma_k}\right)+\dfrac{\partial}{\partial z}\left(\dfrac{\partial K_t}{\partial z}\cdot\dfrac{\nu_t}{\sigma_k}\right)+G-\varepsilon \\ U\dfrac{\partial \varepsilon}{\partial x}+V\dfrac{\partial \varepsilon}{\partial y}+W\dfrac{\partial \varepsilon}{\partial z}=\dfrac{\partial}{\partial y}\left(\dfrac{\partial \varepsilon}{\partial y}\cdot\dfrac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)+\dfrac{\partial}{\partial z}\left(\dfrac{\partial \varepsilon}{\partial z}\cdot\dfrac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)+ \\ +c_1\cdot\varepsilon/K_t\cdot G-c_2\cdot\varepsilon^2/K_t+M_\varphi \end{cases} \quad (3)$$

где M_φ — модификация, генерирующая свойства ренормализированных групп; $\sigma_k, \sigma_\varepsilon$ — дополнительные параметры модели. Характеристики реализуемой *k-ε*-модели и модели напряжений Рейнольдса (RSM) представлены в работах [5,7].

Модели турбулентности при высоких числах Рейнольдса обычно используются вместе с моделями пограничного слоя (пристеночными функциями - ПФ). Поскольку турбулентный пограничный слой оказывает значительное влияние на течения, то сочетание уравнений для

расчета турбулентности и уравнений ПФ представляет, по сути, новую модель расчета течения. Рассмотрены три варианта ПФ, их обозначения: стандартная пристеночная функция – *S;* улучшенная ПФ – *EWT*; масштабируемая ПФ – *Sc* [8]. В сочетании с турбулентными моделями *KE, RNG, KR* и *RSM* в данной работе соответственно модели объекта обозначены как: *M1 (KES), M2 (KEEWT), M3 (KESc), M4 (RNGS), M5 (RNGEWT), M6 (KRS), M7 (KREWT), M8 (RSMEWT).* Параметры пограничного слоя и сеток принимались в соответствие с рекомендациями [8].

Для установившейся области течения в последнее время получены уточненные экспериментальные данные [7]. Эти эксперименты в исследуемой области значений числа Рейнольдса были нами обработаны с помощью кубической сплайн-интерполяции. Полученные значения более точны, чем расчет по известным корреляциям Блазиуса и Никурадзе [10], поэтому именно это значение потерь – Δ^{EXP} принято для сравнения с расчетами CFD. Сравнение расчетных результатов Δ^{RUN} и эталонного Δ^{EXP} значения энергозатрат, для какого либо интервала длины трубы и вида моделей объекта проводилось по формуле:

$$P_{\Delta} = \frac{\left|\Delta^{EXP} - \Delta^{RUN}\right|}{\Delta^{EXP}} \cdot 100 \qquad (4)$$

Расчеты проводились на персональных компьютерах в академической версии программного комплекса ANSYS. Использовался алгоритм SIMPLE со схемой дискретизации второго порядка против потока. Характерный параметр пограничного слоя $\overline{\delta}^*$, рассчитывался как отношение текущего значения *Y+* к значению на границе между буферной и логарифмической областями турбулентного пограничного слоя [10].

На рисунке 1 представлены результаты, полученные нами для области установившегося течения.

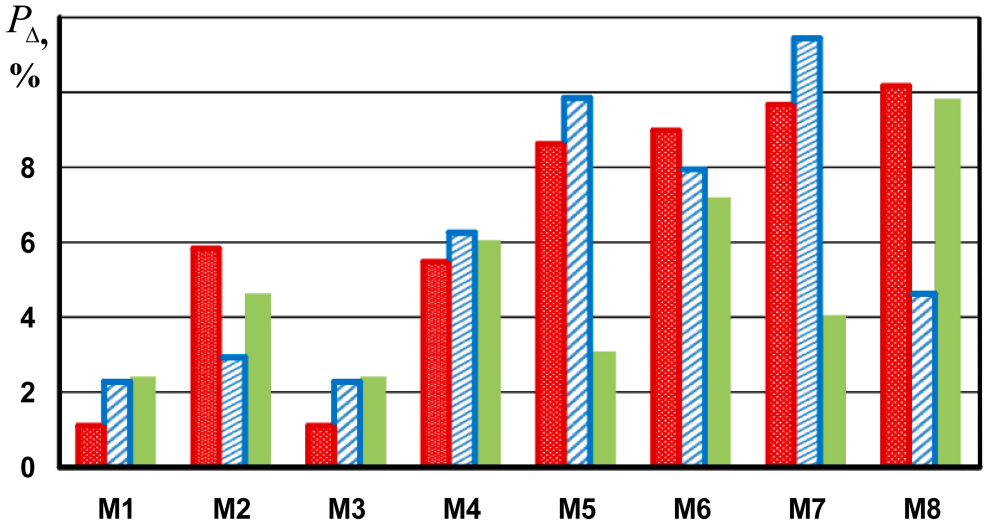


Рисунок 1 — Ошибка в расчете энергозатрат для восьми моделей течения (M1-M8): – $\overline{\delta}^*$=1; – $\overline{\delta}^*$=2; - $\overline{\delta}^*$=3.

Из анализа результатов, представленных на рисунке 1 можно сделать следующие выводы:

1. Приемлемую инженерную точность обеспечивают только модели *KE* со стандартной и масштабируемой пристеночными функциями;

2. Улучшенная пристеночная функция (*EWT)* ухудшает результаты при сочетании со всеми рассмотренными моделями турбулентности;

3. Значение параметра $\overline{\delta}^*$ на нижней границе логарифмической области дает в сочетании с моделью *KE* и стандартной или масштабируемой пристеночными функциями наилучшие результаты;

4. В целом из данных на рисунке 1 следует, что в случае введения в модели турбулентности дополнительных уравнений для учета кривизны и вращения ухудшается точность прогнозирования энергозатрат.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Notes on Numerical Fluid Mechanics; 40 Years of Numerical Fluid Mechanics and Aerodynamics in Retrospect // Ed. E.H. Hirschel, E. Krause. Springer-V. Berlin. 2009. 498 P.

2. Rumsey C.L, Slotnick J.P., Sclafani A.J. Overview and Summary of the Third AIAA High Lift Prediction Workshop // J.Aircraft, 2019, v.56, P.621-644.

3. Белоусов А. С. Моделирование процессов и аппаратов на основе систем вычислительной гидродинамики - новые возможности и проблемы //Материалы пленарной сессии Международного научно-технического симпозиума «Повышение энергоресурсоэффективности и экологической безопасности процессов и аппаратов химической и смежных отраслей промышленности», посвященного 110-летию А.Н. Плановского / М.: ФГБОУ ВО «РГУ им. А. Н. Косыгина», 2021. С. 89–97.

4. M. V. Kraposhin, A. V. Kukharskii, V. N. Korchagova, A. A. Shevelev. An extension of the all-Mach number pressure-based solution framework for numerical modelling of two-phase flows with interface // Industrial processes ang Technologies, 2022, vol. 2, no. 3(5), pp. 6 – 27. DOI: 10.37816/2713-0789-2022-2-3(5)-6-27

5. Белов И.А., Исаев С.А. Моделирование турбулентных течений. СПб.: Балт. гос. Техн. ун-т, 2001. 108 с.

6. Matyushenko A.A., Garbaruk A.V. Non-linear correction for the k-ω SST turbulence model // J. Phys.: Conf. Ser. 929 012102, 2017, v.929, P.1-6.

7. Виноградов А.А., Белоусов А.С., Сафонов С.Г. Методы обобщения данных по инерционным аппаратам и системам пылеулавливания // Энергоресурсоэффективные экологически безопасные технологии и оборудование: сборник науч. трудов Международного научно-технического симпозиума «Вторые международные Косыгинские чтения, приуроченные к 100-летию РГУ имени А. Н. Косыгина»: Т.2. М.: ФГБОУ ВО «РГУ им. А. Н. Косыгина», 2019. С. 259–263.

8. ANSYS Fluent Theory Guide // ANSYS, Inc., 275 Technology Drive Canonsburg, PA 15317, November 2013. 982 P.

9. McKoen B.J., Zagarola M.V., Smits A.J A new friction factor relationship for fully developed pipe flow // J. Fluid Mech. 2005. V. 538. P. 429–443.

10. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1969. 744 с.

УДК 53.043 DOI: 10.37816/eeste-2024-1-45-49

ВОЗМОЖНОСТЬ ЦИФРОВОЙ РЕГИСТРАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАРЯДОВ В СТВОЛАХ ДЕРЕВЬЕВ
POSSIBILITY OF DIGITAL REGISTRATION PARAMETERS OF CHARGE REDISTRIBUTION PROCESSES IN TREE TRUNKS

Нина Сергеевна Камалова, Наталья Юрьевна Евсикова, Николай Николаевич Матвеев, Александр Михайлович Хворых, Юлия Владимировна Крутских
Nina S. Kamalova, Natalia Yu. Evsikova, Nikolai N. Matveev, Alexander M. Khvorykh, Julya V. Krutskikh

Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова, Россия, Воронеж
Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov, Russia, Voronezh
(e-mail: rcamel@yandex.ru, natalyaevsikova@mail.ru, nmtv@vglta.vrn.ru, sasha.khvorykh@yandex.ru, jul.vladimirowna2014@yandex.ru)

Аннотация: Рассмотрена возможность определения жизненного состояния древесных растений по разности потенциалов вдоль ствола дерева. Модель для интерпретации результатов измерений построена в рамках классической теории электролиза. Анализ данных наблюдения за изменениями разности потенциалов в конце августа показывает чувствительность предлагаемого метода к сезонным и суточным флуктуациям процесса перераспределения зарядов в стволе деревьев.

Abstract: The possibility of determining the vital state of woody plants by the potential difference along the tree trunk is considered. A model for interpreting measurement results is built within the framework of the classical theory of electrolysis. Analysis of observation data on changes in the potential difference at the end of August shows the sensitivity of the proposed method to seasonal and daily fluctuations in the process of charge redistribution in the trunk of trees.

Ключевые слова: разность потенциалов, электролиты, электронные приборы, жизненное состояние деревьев, плотность тока ионов.

Key words: potential difference, electrolytes, electronic devices, vital state of trees, ion current density.

На развитие исследований в области мониторинга состояния отдельных деревьев и лесных массивов существенно повлияло наблюдаемое повсеместно изменение климата. Перед современными учеными стоит стратегическая задача разработки неразрушающих уникальную структуру стволов методов измерения характеристик жизненного состояния деревьев. Вода играет важную роль в процессах жизнедеятельности растений. Поэтому ее распределение в различных растениях, включая деревья, все более активно исследуется с помощью электроизмерительных приборов [1-2]. Методами электрографии выявляют разницу в концентрации электролитов и по ней определяют границу между заболонью и ядром [3-4] без выемки кернов, которую необходимо выполнить в рамках диагностики прироста годичных слоев [1-2]. Метод электрорезистивной (*ER*) томографии на основе уровней удельного сопротивления периферических тканей и моделей его поперечного распределения в стеблях растений значительно расширяет возможности моделирования динамики влагопереноса в процессе жизнедеятельности как отдельных деревьев, так и лесных массивов в целом. Модификация метода импеданса земли позволила количественно определять поглощающую поверхность корня без существенного нарушения процессов влагопереноса в деревьях. В современных датчиках водопотребления (например, в *Dynagage Sap Flow*) измеряется

переносимое соком растения количество теплоты, которое затем пересчитывается непосредственно в единицы измерения потока (граммы или килограммы за час) [1-3]. Для использования приборов такого типа нагрев и регистрация осуществляется с помощью электрических сигналов, поступающих от нагревателя и термопары соответственно. Анализ результатов апробации выявил тот факт, что данные, полученные с помощью электрических измерений, коррелируют с показаниями датчиков теплового потока, но не пропорциональны им [2-4]. Поэтому в последнее время уделяется значительное внимание исследованиям процессов передачи между почвой и атмосферой, которые осуществляются на основе наблюдений за разностью потенциалов между корнями и черенками растений. Данные мониторинга выявили суточные вариации с сезонными различиями измеряемой величины [1-3].

В настоящий момент становится очевидным, что применение технической аппаратуры, успешно используемой в исследовании недр, в древесных тканях требует пересмотра принципов интерпретации результатов и разработки концептуального подхода нивелирующего различия между геофизическими и биологическими объектами изучения. Кроме того, необходимо развитие альтернативных подходов к разработке цифровых датчиков состояния таких сложных объектов, как древесные растения. Например, рассматривать процесс влагообмена в деревьях как многоконтурную систему перераспределения растворов солей, параметры которой во многом определяются флуктуациями температуры и влажности окружающей среды [5-7]. Тогда цифровой прибор, измеряющий силу тока или напряжения в одной из ветвей, автоматически будет фиксировать изменение состояния системы в целом.

Цель доклада — обосновать целесообразность измерения разности потенциалов вдоль ствола как базового принципа работы электронного прибора для исследований перераспределения зарядов в стволах деревьев.

Ткани древесины в основном состоят из живых и отмерших клеток эпидермиса, обрамленных кутикулой, которые препятствуют протеканию электрического тока, поэтому известны ее высокие изоляционные свойства. К таким составляющим этой гетероструктуры природного происхождения относятся, например, поверхности коры, листьев и корней. Высокой проводимостью в тканях дерева могут обладать такие проводящие элементы, как сосуды, трахеиды, флоэмные ситовидные трубки, поры ядра и заболони, поскольку заполнены раствором солей с ненулевой концентрацией ионов. Непредсказуемость динамики удельного сопротивления в методах *ER* объясняется неоднородностью и сложностью тканей как гетерогенных электролитов. При измерении разности потенциалов вдоль ствола эту проблему можно разрешить путем рассмотрения именно тканей в качестве многоконтурной сетки электролитических токов, преобладающее направление движения которых определяется изменением факторов окружающей среды. Тогда в основу работы прибора будет положена теория электролиза, согласно которой плотность j электрического тока ионов будет определяться как

$$j = q(n_+ v_+ + n_- v_-) \,, \qquad (1)$$

где q – усредненная величина зарядов ионов в потоке электролитов, заполняющих проводящие элементы тканей ствола дерева; n_+ и n_- – концентрации катионов и анионов, во многом определяемые составом почвы, фотосинтезом и пропускной способностью мембран [7]; v_+ и v_- – их скорости в потоке соответственно.

Поскольку каждая молекула диссоциирует на два иона и в целом раствор нейтрален, то концентрация n катионов и анионов одинакова и может быть определена как

$$n_+ = n_- = \alpha n \,, \qquad (2)$$

где α — коэффициент диссоциации, усредненный по всем видам молекул солей растворов.

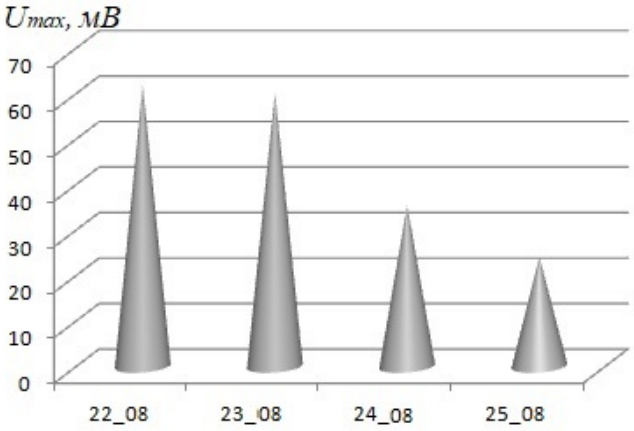


Рисунок 1 — Изменение максимальной величины разности потенциалов вдоль ствола березы в последнюю неделю августа в утренние часы (с 8.00 до 11.00). Измерения проводились цифровым мультиметром *MAS830L*, электроды выполнены из оцинкованной стали.

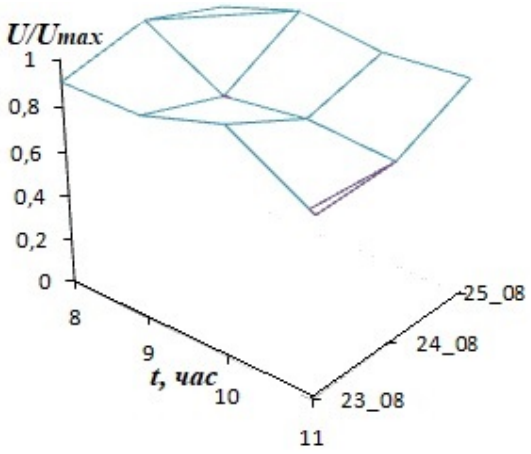


Рисунок 2 — Анализ изменений U/U_{max} в утренние часы в последнюю неделю августа в стволе березы в средней полосе России.

Если обоснованно полагать движение ионов установившимся, то в проводящих элементах сила электрического поля (напряженностью E) уравновешивается силой трения $r_i v_i$ (r_i – коэффициент сопротивления среды для катионов (+) и анионов (–)). Тогда

$$v_+ = b_+E \text{ и } v_- = b_-E \ , \tag{3}$$

где $b_+=q/r_+$ и $b_-=q/r_-$ – подвижности катионов и анионов соответственно.

В результате (1) с учетом (2) и (3) перепишется в виде

$$j = \alpha q n (b_+ + b_-)E \ . \tag{4}$$

Если ввести C_i молярную концентрацию солей в растворителе плотностью ρ_R и молярной массой μ_R проводящих элементов тканей ствола дерева, то концентрацию n можно оценить соотношением

$$n = \mathrm{C}_i \frac{\rho_R N_A}{\mu_R}. \tag{5}$$

Тогда (4) с учетом (5) примет вид:

$$j = \alpha q \mathrm{C}_i \frac{\rho_R N_A}{\mu_R}(b_+ + b_-)E, \tag{6}$$

Из соотношения (3) следует, что при равномерном движении ионов на каждом участке многоконтурной системы будет оправданно предположение о практической неизменности величины E при стабильных внешних условиях. Следовательно, разность потенциалов между

электродами, расположенными вдоль ствола на расстоянии l, можно оценить как $\Delta\varphi=U=El$. Тогда соотношение (6) преобразуется к виду

$$j = \alpha q \mathrm{C}_i \frac{\rho_R N_A}{\mu_R}(b_+ + b_-)\frac{U}{l}, \quad (7)$$

Формула (7) показывает, что при неизменных факторах окружающей среды разность потенциалов, как и плотность тока в проводящих элементах тканей стволов, изменяться не будет. При этом если произойдет изменение температуры или влажности окружающей среды, то изменится скорость установившегося движения потока ионов. Согласно (3) это повлечет за собой изменение $(b_+ + b_-)E$ и, следовательно, разности потенциалов. Таким образом, измерение разности потенциалов вдоль ствола позволит исследовать влияние факторов окружающей среды на потоки ионов в проводящих элементах тканей стволов и, следовательно, на процессы перераспределения зарядов в стволах деревьев.

Измерения разности потенциалов вдоль ствола березы, проведенные в конце августа в утренние часы, когда возрастает солнечная активность, температура и влажность окружающей среды, показали, что с каждым днем ее максимальная величина уменьшалась (см. рис. 1). Это можно объяснить увяданием листвы и спадом интенсивности сокодвижения в стволе дерева, а также изменением молярной концентрации солей (C_i) при неизменном составе почвы. Отсюда следует равенство отношений

$$\frac{j}{j_{max}} = \frac{U}{U_{max}} = \varepsilon. \quad (8)$$

Поэтому флуктуации величины ε в течение суток тоже будут отражать динамику потоков перераспределения зарядов в многоконтурной системе влагообмена в стволе дерева. В проведенном мониторинге величина ε изменялась в интервале от 0,7 до 1,0 в течение утренних часов, причем общую закономерность на настоящий момент выделить не получилось.

Выводы

В заключение хотелось бы отметить, что контроль за разностью потенциалов вдоль ствола дерева можно осуществлять с помощью цифровых мультивольтметров. Следовательно, на основе регистраторов, используемых в цифровых датчиках температуры и влажности, может быть разработан прибор для непрерывного мониторинга разности потенциалов. Предложенный метод оперирует моделями процесса перераспределения зарядов в стволах деревьев, сформированными в рамках физики возникновения электрического тока в электролитах. При этом анализ результатов измерений не сопровождается трудностями интерпретации, поскольку разработан в рамках уникального подхода. Таким образом, возможность описываемых измерений обусловлена классическими физическими моделями. Кроме того, проведение исследований разности потенциалов в стволах деревьев позволит сформировать базу данных о влиянии факторов окружающей среды на процессы перераспределения зарядов в них в процессе жизнедеятельности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ganthaler A., Sailer J., Bär A., Losso A., Mayr S.* Noninvasive Analysis of Tree Stems by Electrical Resistivity Tomography: Unraveling the Effects of Temperature, Water Status, and Electrode Installation // Front. Plant Sci. 2019. V. 10. P. 1455. doi 10.3389/fpls.2019.01455

2. *Jaivime E., Scott J., McDonnell J.J.* Global separation of plant transpiration from groundwater and streamflow // Nature. 2015. V. 525. No. 7567. P. 91. doi 10.1038/nature14983

3. *Губарева Т.С., Лупаков С.Ю., Гарцман Б.И., Шамов В.В., Рубцов А.В., Кожевникова Н.К.* Возможности оценивания бассейновой транспирации на основе измерения стволового сокодвижения: постановка задачи // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2019. Т. 1. Вып. 4. С. 504. doi 10.34753/HS.2019.1.4.504

4. *Wang H., Tetzlaff D., Soulsby C.* Hysteretic response of sap flow in Scots pine (Pinus sylvestris) to meteorological forcing in a humid low-energy headwater catchment // Ecohydrology. 2019. V. 12. Iss. 6. E2125. doi 10.1002/eco.2125

5. *Kamalova N.S., Evsikova N.Yu., Saushkin V.V.* Innovative approach to the assessment of moisture content of forest areas within the framework of the fundamental multi-layered concept // IOP Conference Series : Earth and Environmental Science. 2019. V. 392. 012043. doi 10.1088/1755-1315/392/1/012043

6. *Евсикова Н.Ю., Камалова Н.С., Саврасова Н.С.* Цифровые методы анализа состояния лесных массивов // Энергоресурсоэффективные экологически безопасные технологии и оборудование : сборник научных трудов международного научно-технического симпозиума «Вторые международные Косыгинские чтения», приуроченные к 100-летию РГУ имени А.Н. Косыгина, 29 октября-1 ноября 2019 г. / Российский государственный университет имени А. Н. Косыгина. Москва : РГУ им. А. Н. Косыгина, 2019. Т. 2. С. 220.

7. *Камалова Н.С., Евсикова Н.Ю., Постников В.В., Матвеев Н.Н., Саврасова Н.А.* Оценка избыточного давления растворов на мембраны в порах гетерогенных структур природного происхождения // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2016. Т. 16. № 2. С. 144.

УДК 621.6.04 DOI: 10.37816/eeste-2024-1-49-53

РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА НЕОДНОРОДНОСТИ ПОЛИМЕРНОЙ СМЕСИ
THE HETEROGENEITY COEFFICIENT CALCULATION OF A POLYMER MIXTURE

Анна Борисовна Капранова, Дмитрий Владимирович Стенько,
Дарья Дмитриевна Бахаева, Дарья Владимировна Федорова
Anna B. Kapranova, Dmitry V. Stenko,
Daria D. Bakhaeva, Daria V. Fedorova

Ярославский государственный технический университет, Россия, Ярославль
Yaroslavl State Technical University, Russia, Yaroslavl
(e-mail: kapranova_anna@mail.ru)

Аннотация: Предложен способ расчета коэффициента неоднородности смеси твердых дисперсных компонентов из несферических полимерных частиц при смешении в пересекающихся разреженных потоках, образующихся в рабочем объеме ротационного аппарата.

Abstract: A method is proposed for calculating the coefficient of heterogeneity of a mixture of solid dispersed components from non-spherical polymer particles when mixed in intersecting rarefied flows formed in the working volume of a rotary apparatus.

Ключевые слова: полимерные частицы, компоненты, смесь, смешение, коэффициент неоднородности.

Keywords: polymer particles, components, mixture, mixing, heterogeneity coefficient.

Совершенствование оборудования для смешения вторичного и первичного полимерных компонентов способствуют решению задач по энерго- и ресурсо- эффективности современных производственных цепочек и, как правило, согласуется с принципами системно-структурного анализа [1] исследуемого процесса. Получение качественной смеси из несферических полимерных частиц в регламентном соотношении относится к актуальной теме для многих производств по переработке полимерного сырья, в том числе вторичного. Например, процесс смешения твердых дисперсных полимерных компонентов перед загрузкой в литьевую машину, применяемую для 3D печати, может быть представлен как дополнительный этап переработки полимерного сырья в предложенном ротационном аппарате [2, 3] для повышения показателей цветопередачи, прочности, морозостойкости, устойчивости к циклическим перепадам температур и т.д. для готового продукта.

Применение ротационного аппарата для смешения указанных сред в сравнении со смесителями других типов (центробежно-лопастных, гравитационных, барабанных,

пневматических и др.) является предпочтительным по признаку достижения регламентного показателя коэффициента неоднородности менее 6,5 % [4-5].

В настоящей работе исследуется двухэтапное смешение в разреженных потоках частиц IV класса сыпучести по методике Керра [6] твердых дисперсных полимерных компонентов соответственно с помощью симметрично расположенных относительно вертикали рабочего объема ротационного аппарата (рисунок 1): на этапе 1 – двух узлов *барабан-прямоугольные лопатки*; на этапе 2 – двух наклонных отбойных поверхностей (этап 2). Элементы данной конструкции [2, 3] представлены на рисунке 1. Основной принцип работы аппарата заключается в следующем. Два твердых дисперсных полимерных компонента загружаются в бункеры-дозаторы *1*, поступают в зазоры между внутренней поверхностью камеры смесительного узла *7* и прямолинейными лопатками *2*, закрепленными в два ряда с заданным углом смещения по касательной к цилиндрической поверхности вращающегося барабанов *3*. Полимерные частицы смешиваемых компонентов разбрасываются внутри корпуса *5* в виде двух пересекающихся разреженных потоков (этап 1), которые отражаются от наклонных отбойных поверхностей под крышкой *4* (этап 2). Смешение указанных частиц реализуется в этих потоках сначала при скрещивании потоков, выбрасываемых из зазора *барабан-камера узла*, а затем при отражении от отбойников. Готовая смесь поступает в выпускное отверстие *6*, например, связанное с загрузочным устройством литьевой машины [3].

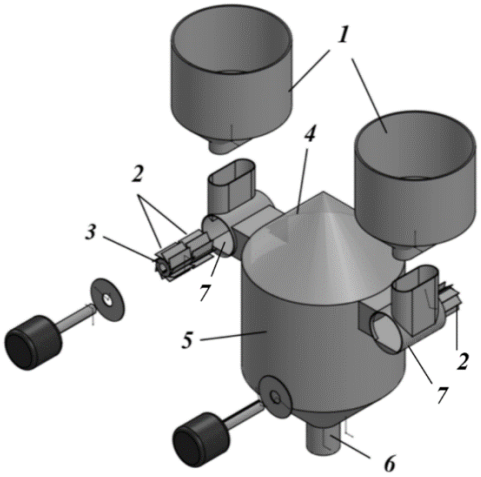


Рисунок 1 — Условная схема 3D модели ротационного аппарата: *1* – бункеры-дозаторы; *2* – прямолинейные лопатки; *3* – барабан; *4* – крышка с отбойными поверхностями; *5* – корпус; *6* – выпускное отверстие; *7* – камера смесительного узла

Предлагается выбор критерия оценки качества полимерной смеси с соотношением объемов V_i в готовой смеси $V_1 : V_2 = d_{V_1} : d_{V_2}$ согласно их долям d_{V_i} остановить на классическом определении коэффициента неоднородности V_C сыпучего продукта из двух компонентов [4] – ключевого ($i = 1$, вторичное сырье) и транспортирующего ($i = 2$, первичный полимер)

$$V_C = \left(\frac{\langle c_1^2 \rangle}{\langle c_1 \rangle^2} - 1\right)^{1/2}, \quad (1)$$

где для объёмной доли ключевого компонента c_1, $i = 1$ плотностью вещества ρ_i обозначены соответствующие значения квадрата среднего $\langle c_1 \rangle^2$ и среднего от квадрата $\langle c_1^2 \rangle$, определяемые в соответствии с энергетическим методом моделирования [7] процесса смешения дисперсного полимерного сырья [8-10]. В дальнейшем изложении опущен индекс для номера смесительного узла k, принято $k = i$ при выполнении симметрии расположения смесительных узлов и отбойников.

Расчет указанных значений c_1, $\langle c_1 \rangle$, $\langle c_1^2 \rangle$ выполняется согласно выражениям

$$c_1(\gamma_{21}, \gamma_{22}) = \frac{d_{V_1} \rho_1 G_{S1}^{(ne)}(\gamma_{21})}{\sum_{i=1}^{2} d_{V_i} \rho_i G_{Si}^{(ne)}(\gamma_{2i})}, \quad (2)$$

$$\langle c_1 \rangle = \prod_{i=1}^{2}(\gamma_{21}+\gamma_{22})^{-1}\int_{\gamma_{22\min}}^{\gamma_{22\max}} d\gamma_{22}\int_{\gamma_{22\min}}^{\gamma_{22\max}} c_1(\gamma_{21},\gamma_{22})d\gamma_{21}, \quad (3)$$

$$\langle c_1^2 \rangle = \prod_{i=1}^{2}(\gamma_{21}+\gamma_{22})^{-1}\int_{\gamma_{22\min}}^{\gamma_{22\max}} d\gamma_{22}\int_{\gamma_{22\min}}^{\gamma_{22\max}} [c_1(\gamma_{21},\gamma_{22})]^2 d\gamma_{21}. \quad (4)$$

Здесь обозначено: γ_{2i} – усредненный угол отражения разреженного потока компонента *i* после упругого удара о наклонные отбойные поверхности под крышкой *4* (см. рисунок 1) налетающего разреженного потока этого компонента *i*, образованного при работе смесительного узла *k* = *i*, состоящего из барабана *3* и рядов *j* = 1, 2 прямоугольных лопаток *2* в камере *7*; $\gamma_{22\max}$, $\gamma_{22\min}$ – максимальное и минимальное значения данного угла; $G_{Si}^{(ne)}(\gamma_{2i})$ – неравновесная дифференциальная функция распределения числа несферических полимерных частиц компонента *i* по углу отражения γ_{2i} от указанных отбойников с учетом: приближений об энергетической не замкнутости макросистемы *i* аналогично [8] согласно подходу [7]; работы всех рядов лопаток *j* = 1, 2 смесительного узла *k* = *i*, описанной для случая сонаправленных разреженных потоков [9, 10] и обобщенной для скрещивающихся потоков; множества характеристик физических свойств рабочих материалов $\{s_1\}$, дополнительных показателей упругого деформирования лопаток и ударного взаимодействия отбойников $\{s_2\}$, конструктивных $\{s_3\}$ и режимных $\{s_4\}$ параметров изучаемого процесса смешения при симметричном расположении смесительных узлов и отбойников (*k* = *i*):

$$s_1 = \{k_{fi}, d_i, \sigma_i, M_i, \rho_i, T_{gi}, \rho_{vi}, \varepsilon_i', \mathrm{tg}\delta_{i\max}, \mathrm{tg}\delta_{i\min}, \nu\}, \qquad s_2 = \{k_u, k_{Vi}\}, \quad (5)$$

$$s_3 = \{q_{si}, q_{ri}, \alpha_i, R_{Ci}, L_{bi}, h_{0gi}, h_{1gi}, H_{gi}, \alpha_{i0}, \psi_i\}, \qquad s_4 = \{\omega_i\}. \quad (6)$$

Выражения (5), (6) для множеств $\{s_w\}$, *w* = 1, …, 4 включают: k_{fi} – коэффициент формы полимерной частицы компонента *i*; d_i – диаметр частиц после усреднения по фракциям компонента *i*; σ_i – площадь поверхности несферической частицы сорта *i*; M_i, ρ_i, T_{gi}– молярная масса, плотность, абсолютная температура стеклования вещества компонента *i*; $\rho_{vi}, \varepsilon_i', \mathrm{tg}\delta_{i\max}, \mathrm{tg}\delta_{i\min}$ – характеристики электрических свойств полимеров: относительная диалектическая проницаемость и предельные значения тангенса угла диэлектрических потерь при периодической частоте ν ; k_u – угловой коэффициент жесткости лопаток; k_{Vi} – коэффициент восстановления скорости для усредненного направления движения частиц в разреженном потоке после упругого взаимодействия с наклонной отбойной поверхностью; q_{si} – число лопаток *2* в одном ряду (см. рисунок 1); q_{ri} – число рядов лопаток *2*; α_i – радиальный угол смещения этих рядов; R_{Ci} – радиус барабана *3*; L_{bi} – длина лопаток *2*; h_{1gi} – высота зазора между барабаном *3* и камерой *7* в крайнем нижнем положении лопаток; ψ_i – угол наклона отбойника, рад; ω_i – угловая скорость вращения барабана *3*; $h_{0gi}, H_{gi}, \alpha_{i0}$ – характеристические параметры камеры *7* смесительного узла, в том числе определяющие размер зазора η_i на выходе лопатки из смесительного узла

$$\eta_i = [(h_{1gi} - h_{0gi} + R_{Ci})/\cos\alpha_{i0} - R_{Ci}]/L_{bi}. \quad (7)$$

Проиллюстрируем предложенный способ расчета коэффициента неоднородности полимерной смеси на примере смешения вторичного ГОСТ Р 57043-2016 (*i* = 1) и первичного ГОСТ 26996-86 (*i* = 2) полипропилена в рабочем объеме проектируемого ротационного аппарата (см. рисунок 1). Данные о значениях основных параметров получения смеси вторичного ГОСТ Р 57043-2016 (*i* = 1) и первичного ГОСТ 26996-86 (*i* = 2) полипропилена представлены в таблице 1. Значения коэффициента восстановления k_{Vi} зависят от значений режимного параметра ω_i, в частности, нижний предел изменения ω_i соответствует верхнему пределу для k_{Vi}, например, при $\omega_1 = 31.4$ с$^{-1}$ $k_{V1} = 0.39$ (см. таблицу 1).

Таблица 1 – Данные о значениях основных параметров получения смеси вторичного ГОСТ Р 57043-2016 (i = 1) и первичного ГОСТ 26996-86 (i = 2) полипропилена.

Параметр	Полипропилен вторичный ГОСТ Р 57043-2016 (i = 1)	Полипропилен первичный ГОСТ 26996-86 (i = 2)
k_{fi}	0.3	0.28
d_i, 10^{-3} м	4.435	5.490
σ_i, 10^{-5} м^2	6.59	4.40
M_i, 10^2 кг·моль$^{-1}$	4.2	4.2
ρ_i, 10^2 м^3/кг	9.3	9.1
T_{gi}, К	258.15	264.15
ρ_{vi}, 10^3 ПОм·м	1	1
ε_i'	2.2	2.2
$\mathrm{tg}\delta_{i\max}$, 10^{-4}	3	3
$\mathrm{tg}\delta_{i\min}$, 10^{-4}	5	5
ν, МГц	1	1
k_u, 10^{-4} кг·м/рад	5	5
d_{V_i}	1	9
q_{si}	6	6
q_{ri}	2	2
α_i, рад	0.5236	0.5236
R_{Ci}, 10^{-2} м	2.5	2.5
L_{bi}, 10^{-2} м	6.5	6.5
h_{0gi}, 10^{-3} м	3	3
h_{1gi}, 10^{-2} м	4.5…5.5	4.5…5.5
H_{gi}, 10^{-3} м	9.91	9.91
α_{i0}, рад	0.5236	0.5236
ψ_i, рад	0.7…1.2	0.7…1.2
k_{Vi}	0.39…0.42	0.43…0.45
ω_i, с$^{-1}$	31.4…52.4	31.4…52.4

Согласно предложенным выражениям (2)-(4) наблюдается повышение значений экстремумов для угловой скорости вращения барабанов с 35 с$^{-1}$ до 50 с$^{-1}$ со снижением характерных минимальных значений коэффициента неоднородности V_C получаемой полимерной смеси с 6.5 % до 4.5 % при соотношении компонентов d_{V_1}: d_{V_2} = 1:9. Данный факт влияет на формировании инженерной методики расчета параметров процесса смешения твердых дисперсных полимерных компонентов при поиске рациональных диапазонов изменения режимных параметров ω_i для экономии энергоресурсов. Учет вторичных столкновений разносортных полимерных частиц в отраженных от отбойников разреженных потоках (графики *1'*, *2'*, *3'*, рисунок 2) изменяет поведение зависимости $V_C(\psi_i)$ вблизи минимумов с сторону улучшения качества полимерной смеси при снижении коэффициента неоднородности на 0.05…0.1 %.

Таким образом, актуальное для 3D печати смешение полимерных частиц первичного и вторичного характера относится к перспективному направлению совершенствования данных технологий по предварительной переработке полимерного сырья. В дальнейшем результаты исследования следует расширить в области использования различного рода наполнителей полимерных компонентов, в том числе, с различными электрическими свойствами.

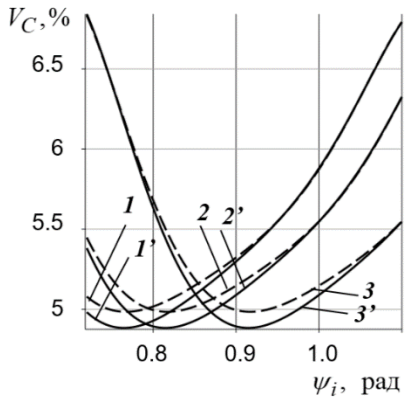


Рисунок 2 — Теоретическая зависимость $V_C(\psi_i)$ с учетом электростатического эффекта и столкновений частиц компонентов смеси вторичного ГОСТ Р 57043-2016 (i = 1) и первичного ГОСТ 26996-86 (i = 2) полипропилена: q_{si}= 2; q_{ri} = 6; η_i= 0,75;
1, *1'* – ω_i = 31,4 с$^{-1}$, *2*, *2'*– ω_i = 41,9 с$^{-1}$, *3*, *3'* – ω_i = 52,4 с$^{-1}$;
1-3 (*1'-3'*) – без учета (с учетом) вторичных столкновений.

Выводы

Проведенные исследования по установлению зависимости между коэффициентом неоднородности полимерной смеси и наиболее значимыми параметрами процесса смешения компонентов (угловой скорости вращения смесительных барабанов, зазора на выходе лопастей из смесительного узла, угла наклона отбойников) показали возможность реализации данной технологической операции в разреженных потоках разносортных частиц при двухэтапной работе ротационного аппарата при значениях указанного коэффициента 4.5…6.5 %. Результаты могут быть использованы при формировании инженерной методики расчета параметров проектируемого ротационного смесителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кафаров В.В., Дорохов И.Н., Арутюнов С.Ю.* Системный анализ процессов химической технологии. Процессы измельчения и смешивания сыпучих материалов. М.: 1985. 440 с.

2. *Лебедев А.Е., Капранова А.Б., Стенько Д.В.* Смеситель сыпучих материалов. Патент № 2749510 РФ. Кл. МПК B01F 3/18, B01F 5/04, B01F 7/00, B01F 9/10. 11.06.2021, Б.И. № 17.

3. *Stenko D., Kapranova A., Bakhaeva D., Fedorova D.* Parametric 3-D Modeling of a Rotary Mixer for Mixing Granules of Thermosoftening Plastic Materials. *Fibre Chem*. 2022. 53, 379-381.

4. *Макаров Ю.И.* Аппараты для смешения сыпучих материалов. М.: Машиностроение. 1973. 216 с.

5. *Гарабажиу А.А.* Интенсификация процессов перемешивания сухих сыпучих материалов в современных конструкциях смесителей // Строительная наука и техника. 2010. № 4. С. 27–42.

6. *Лукьянов П.И.* Аппараты с движущимся зернистым слоем. Теория и расчет. М.: Химия, 1974. 184 с.

7. *Климонтович Ю.Л.* Турбулентное движение и структура хаоса: Новый подход к статистической теории открытых систем. М.: ЛЕНАНД. 2014. 328 с.

8. *Kapranova A.B., Verloka I.I.* Stochastic Description of the Formation of Flows of Particulate Components in Apparatuses with Brush Elements // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2018. 52(6), P. 1004-1018.

9. *Stenko D.V., Kapranova A.B., Bahaeva D.D., Fedorova D.V., Lebedev A.E.* Stochastic analysis of rotary mixing of polymer components in the framework of recycling and the development of 3D printing technologies // Chemical and Petroleum Engineering. 2022. 57(11-12). P. 920-929.

10. *Kapranova A.B., Stenko D.V., Lebedev A.E., Gudanov I.S., Lichak D.A.* Analysis of energy parameters in the model of pre-mixing of dispersed polymeric components for 3D printing. Chemical and Petroleum Engineering, 2023, 59(1). P. 76-75.

УДК 621.927.9 DOI: 10.37816/eeste-2024-1-54-58

ВЫБОР ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ БИСЕРНЫХ МЕЛЬНИЦ
THE SELECTION OF ENERGY-EFFICIENT OPERATING PARAMETERS OF AN AGITATOR BEAD MILLS

Геннадий Алексеевич Носов*, Лариса Степановна Елиневская,**
Роман Николаевич Иванов**
Gennady A. Nosov*, Larisa S. Elinevskaya, Roman N. Ivanov****

** МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, Россия*
** MIREA — Russian Technological University, Moscow, Russia*
(e-mail: nosovga@mail.ru)
*** АО Фирма Август, Москва, 129515, Россия*
*** JSC «August» Inc, Moscow, 129515, Russia*
(e-mail: l.elinevskaya@avgust.com, r.ivanov@avgust.com)

Аннотация: Рассмотрены особенности работы бисерных мельниц. Предложен метод подбора технологических параметров проведения энергосберегающего мокрого измельчения продуктов в бисерной мельнице.

Abstract: The features of the operation of an agitator bead mills are considered. A method for selection of technological parameters for energy-saving wet grinding of products in an agitator bead mills is proposed.

Ключевые слова: бисерные мельницы, тонкодисперсные суспензии, энергоэффективный процесс, мокрое измельчение, структура потока.

Keywords: agitator bead mills, stirred media mills, fine suspensions, energy-efficient process, wet grinding, structure of flow.

В настоящее время в технологии жидкого измельчения широкое применение получили бисерные мельницы [1,2]. Это связано с тем, что бисерные мельницы обладают рядом преимуществ по сравнению с другими аппаратами для мокрого измельчения. В качестве примера продуктов, получаемых с помощью бисерных мельниц, можно привести краски и лаки, химические средства защиты растений, шоколад, строительные смеси, суспензии для литий-ионных аккумуляторов, лекарственные препараты и др.

Следует отметить, что в настоящее время теория работы бисерных мельниц пока разработана слабо [2-4]. Это связано с тем, что закономерности процесса диспергирования твёрдой фазы в бисерных мельницах сложны и зависят от множества переменных [1-9].

Для описания закономерности работы бисерной мельницы предложено [1] использовать теорию интенсивности разрушающих напряжений. При этом данный процесс рассматривается с энергетической точки зрения. Известно, что степень измельчения материала пропорциональная затраченной на его разрушение удельной энергии [1,2,5,10]. Удельную энергию, подводимую в мельницах $E_m(\tau)$ можно оценить по крутящему моменту ротора мельницы [1], используя зависимость

$$E_m(\tau) = \frac{E(\tau)}{m} = \frac{1}{m}\int_0^{\tau}(P(\tau) - P_0)d\tau = \frac{2\pi\omega}{m}\int_0^{\tau}(T(\tau) - T_0)d\tau, \quad (1)$$

где $E(\tau)$ – подведённая энергия за время τ; m – масса измельчаемого материала; $P(\tau)$ – механическая мощность затраченная на процесс измельчения; P_0 – мощность холостого хода; ω – частота вращения ротора мельницы; $T(\tau)$ - крутящий момент; T_0 – крутящий момент на холостом ходу.

При анализе результатов измельчения суспензий известняка в бисерной мельнице при различных технологических параметрах было обнаружено [1], что для получения заданной крупности продукта можно затратить разное количество удельной энергии. В дальнейшем

такая же закономерность была обнаружена при измельчении суспензий с другими дисперсными фазами. Это побудило авторов работы [1] к созданию теории стрессовых напряжений. Согласно данной теории энергетические затраты на измельчение зависят от двух факторов: числа актов измельчения *SN* и интенсивности элементарного столкновения *SI*. При этом для расчёта величины *SN* предложена зависимость

$$SN \propto \frac{\varphi_{GM}(1-\varepsilon)}{\left(1-\varphi_{GM}(1-\varepsilon)\right)x_V} \cdot \frac{\omega\tau}{d_{GM}^2}, \quad (2)$$

где τ – время работы мельницы; φ_{GM} – объёмная доля бисера в размольной камере; ε – порозность бисера; d_{GM} – диаметр бисера; x_V – объёмная доля твёрдой фазы в суспензии.

Интенсивность элементарного столкновения *SI* можно установить, используя зависимость

$$SI \propto r_\eta SE_{GM} k \propto \left(1+\frac{1}{St_{GM}}\ln\left(\frac{x}{d_{GM}}\right)\right)^2 d_{GM}^3 \rho_{GM} v_D^2 \left(1+\frac{Y_p}{Y_{GM}}\right)^{-1}, \quad (3)$$

где r_η – коэффициент демпфирования, учитывающий потерю части энергии мелющих тел на преодоление вязкостного трения; SE_{GM} - энергия элементарного соударения мелющих тел; k - коэффициент, учитывающий потерю энергии на деформацию мелющих тел при элементарном соударении; St_{GM} – число Стокса; x – исходный размер частиц дисперсной фазы; ρ_{GM} – плотность бисера; v_D – максимальная линейная скорость ротора мельницы; Y_p, Y_{GM} – модуль Юнга частиц дисперсной фазы и частиц бисера.

С учётом отмеченных выше факторов можно установить величину удельной энергии

$$E_m \propto SN \cdot SI\,. \quad (4)$$

Из выражения (4) следует, что можно добиться определённого расхода подводимой энергии либо большим количеством соударений в единицу времени, но с небольшой интенсивностью элементарного соударения, либо за счёт небольшого количества соударений, но при большой их интенсивности. Очевидно, что для каждого измельчаемого продукта существует определённое значение *SN* и *SI* при котором будет затрачиваться минимум удельной энергии, требуемой для измельчения дисперсной фазы до определённого размера частиц [1].

На рис. 1 изображены опытные данные измельчения водных суспензий известняка [1]. Можно заметить, что до оптимального значения SE_{GM} материал не измельчается, ему не хватает энергии элементарного соударения, хотя при этом количество соударений большое. Далее при повышении SE_{GM} суспензия известняка начинает измельчаться до более высокой дисперсности. При оптимальном значении SE_{GM} степень измельчения максимальна при одной и той же затраченной удельной энергии. При дальнейшем повышении SE_{GM} увеличивается диссипация избыточной энергии при столкновении мелющих тел в окружающее пространство. Также частота столкновений становится меньше, поэтому размол ухудшается. Из приведённых данных можно также отметить, что при увеличении степени измельчения оптимум SE_{GM} уменьшается. Это связано с тем, что для маленьких частиц требуется меньшая энергия разрушения, чем для более крупных.

Для мягких материалов дисперсных фаз ($k \approx 1$) и для относительно невязких продуктов ($r_\eta \approx 1$) подведённую удельную энергию E_m можно оценить, используя зависимость [1]

$$E_m \propto \frac{\varphi_{GM}(1-\varepsilon)\,(\pi D)^2}{\left(1-\varphi_{GM}(1-\varepsilon)\right)x_V}\omega^3 t \rho_{GM} d_{GM}\,. \quad (5)$$

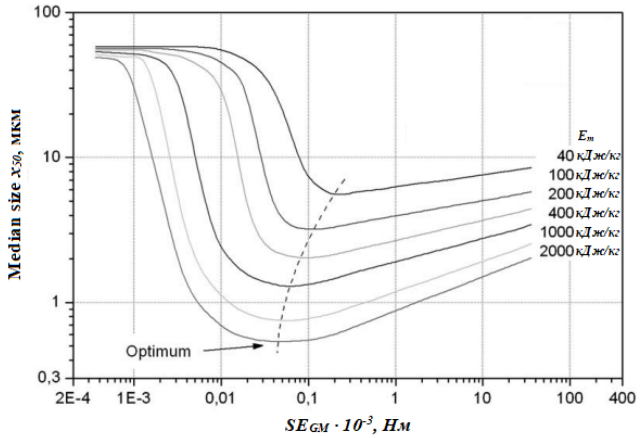


Рисунок 2 — Зависимость среднего размера частиц в суспензии x_{50} от энергии элементарного соударения мелющих тел SE_{GM} и затраченной удельной энергии E_m (стеклянный бисер, φ_{GM} = 80% заполнения, c_m = 40% масс) [1].

Отметим, что проводимые по данной теории расчёты не всегда согласуются с экспериментом [2,4]. Это связано с тем, что не всегда удается корректно определить используемые в ней параметры и коэффициенты, зависящие не только от технологических режимов процесса, но и от конкретных особенностей используемого оборудования, а также от физико-механических свойств измельчаемого продукта [1-2, 4, 6-9]. Тем не менее данная теория является не плохим инструментом для поиска энергосберегающих режимов работы бисерных мельниц [1,2].

Цель данной работы заключается в разработке методики по определению энергосберегающих режимов работы для выбранных бисерных мельниц.

Для определения технологических параметров энергосберегающего режима работы бисерной мельницы необходимо выполнить следующие действия:

1. Выбор материала мелющих тел.

Материал бисера следует выбирать таким образом, чтобы износ размольной камеры и самого бисера был минимальным. При этом необходимо, чтобы модуль Юнга мелющих тел был выше модуля Юнга измельчаемого материала. Также материал бисера должен быть инертен к компонентам измельчаемой суспензии.

2. Выбор степени заполнения размольной камеры мелющими телами.

Отметим, что при увеличении степени наполнения бисера увеличивается число контактов мелющих тел в единицу времени, что приводит к увеличению степени измельчения [1]. Но при высоких степенях наполнения размол может ухудшаться из-за понижения скорости движения бисера из-за более стеснённых условий. Также известно [1], что при повышении степени наполнения мелющих тел, повышается доля передаваемой энергии частицам измельчаемого материала от ротора мельницы. Поэтому данный параметр очевидно является оптимальным для каждой мельницы и для каждого продукта.

3. Выбор концентрации твёрдой фазы и начальной дисперсности суспензии.

Исходный размер частиц твёрдой фазы суспензии до измельчения должен быть меньше размера бисера для того, чтобы происходил захват частицы во время столкновения мелющих тел. Обычно, чем больше размер частиц твёрдой фазы, тем больше должен быть бисер и наоборот [1]. На практике часто каждый производитель бисерной мельницы даёт свои рекомендации по данному вопросу.

Заметим, что согласно теории стрессовых напряжений, существует приведенный параметр SN_r, который устанавливает взаимосвязь между количеством стрессовых событий и размером частиц твёрдой фазы в исходной суспензии, который можно оценить, используя зависимость [1]

$$SN_r \propto \frac{\varphi_{GM}(1-\varepsilon)\omega\tau}{\left(1-\varphi_{GM}(1-\varepsilon)\right)x_V}\cdot\left(\frac{d_p}{d_{GM}}\right)^2. \quad (6)$$

Очевидно, что чем выше концентрация дисперсной фазы, тем выше вероятность того, что частица будет захвачена во время элементарного столкновения. Поэтому согласно зависимости (6) при повышении концентрации твёрдой фазы удельная энергия понижается, так как нужно меньшее количество столкновений. Но при повышении концентрации твёрдой фазы возрастает эффективная вязкость измельчаемой суспензии. Таким образом, необходимо подобрать такую концентрацию частиц твёрдой фазы, чтобы вязкость была приемлемой, а крутящий момент не превышал номинального значения. К тому же при повышении вязкости исходной суспензии часть энергии будет тратится на преодоление сил вязкостного трения и размол будет ухудшаться.

Предел динамической вязкости шихты, при которой возможна предсказуемая работа бисерной мельницы можно оценить, используя зависимость [1,2]

$$\eta = \frac{\upsilon_{GM\,\max}\rho_{GM}d_{GM}}{9\left(\ln(d_{GM})-\ln(d_p)\right)}. \quad (7)$$

Отметим, что для понижения вязкости шихты можно использовать реологические модификаторы и применять более тяжелый бисер [1].

1. Подбор скорости вращения ротора мельницы.

Скорость ротора обычно подбирают таким образом, чтобы она была максимально допустимой для данного типа бисера, а температура продукта во время измельчения не превышала установленную технологом величину. Выбор максимально допустимой скорости вращения ротора мельницы обусловлен тем, что при использовании оптимальных параметров процесса подвод механической энергии будет максимальным. При этом на проводимые процессы будет затрачено наименьшее время.

2. Проведение экспериментов.

Для определения минимума удельной энергии для используемой мельницы и измельчаемого продукта, желательно провести хотя бы несколько экспериментов по измельчению продуктов в периодическом режиме работы. Это позволит получить зависимости типа тех, что приведены на рис. 1, и по полученным зависимостям определить значение SI_{opt}.

3. Уточнение диаметра бисера.

После выполнения действий согласно пунктам 1-5 будут получены более обоснованные данные для подбора необходимого бисера. При этом следует проверить возможность использования бисера установленного размера по технической документации используемой бисерной мельницы. Также необходимо проверить совместимость системы классификации мелющих тел с выбранным бисером. После этого желательно провести измельчение в периодическом режиме работы мельницы и определить кинетическую характеристики $d_p = f(\tau)$ для подбора оптимального режима её работы.

4. Определение расхода шихты для проходного режима работы.

Расход шихты, необходимый для достижения нужной дисперсности можно установить, используя кинетическую кривую для периодического режима измельчения [10]

$$d_{\text{рез}} = \int_0^\infty d(\tau)\phi(\tau)d\tau\,, \quad (8)$$

где $d(\tau)$ $\mathrm{U}(\tau)$ – кинетическая кривая для периодического процесса, $\phi(\tau)$ $\phi(\tau)$ – функция плотности распределения частиц потока по времени пребывания.

Для решения этой задачи нужно иметь информацию о структуре потока в используемой мельнице. Известно [1], что часто структура потока в бисерных мельницах можно описать двумя моделями: диффузионной или рециркуляционной. При этом необходимо в случае диффузионной модели структуры потока обладать информацией о зависимости эффективного критерия Пекле от расхода измельчаемой суспензии. В случае же использования

рециркуляционной модели требуется установить зависимость коэффициента рециркуляции от расхода шихты.

5. Подбор расхода и температуры хладагента.

Для корректного решения данной задачи следует провести расчёт конвективного теплообмена с ограниченным продольным перемешиванием теплоносителей. После этого можно определить расход и температуру хладагента и установить конечную температуру продукта после измельчения. Если структура потока в мельнице описывается диффузионной моделью можно применять модель теплообмена, описанную в источнике [10]. Если же структура потока описывается рециркуляционной моделью, то требуется подобрать параметры теплообмена, решая систему уравнений численными методами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kwade A., Schwedes J.* Wet Grinding in Stirred Media Mills. Handbook of Powder Technology. 2007. V. 12. P. 253-380.

2. *Taylor L., Skuse D., Blackburn S., Greenwood R.* Stirred media mills in the mining industry: Material grindability, energy-size relationships, and operating conditions // Powder Technology. 2020. V. 369. P. 1-16.

3. *Островский Г.М.* Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий. Ч.1. СПб.: АНО НПО «Профессионал». 2004. 848 с.

4. *Böttcher A-C., Schilde C., Kwade A.* Experimental assessment of grinding bead velocity distributions and stressing conditions in stirred media mills // Advanced Powder Technology. 2021. V. 32, № 2. P. 413-423.

5. *Сиденко П.М.* Измельчение в химической промышленности. М.: Химия, 1977. 368 с.

6. *Thon C., Böttcher A-C., Möhlen F., Yu M., Kwade A., Schilde C*. Multi-modal framework to model wet milling through numerical simulations and artificial intelligence (part 1) // Chemical Engineering Journal. 2022. V. 449. A. 137794.

7. *Nöske M., Müller J., Nowak C., Li K., Xu X., Breitung-Faes S., Kwade A.* Multicomponent Comminution within a Stirred Media Mill and Its Application for Processing a Lithium-Ion Battery Slurry // Processes. 2022. V. 10. A. 2309.

8. *Sterling D., Breitung-Faes S., Kwade A.* Experimental evaluation of the energy transfer within wet operated stirred media mills // Powder Technology. 2023. V.425. A.118579.

9. *Guner G., Yilmaz D., Yao H. F., Clancy D. J., Bilgili E.* Predicting the Temperature Evolution during Nanomilling of Drug Suspensions via a Semi-Theoretical Lumped Parameter Model // Pharmaceutics. 2022. V. 14. N. 12. P. 2840.

10. *Айнштейн В. Г., Захаров М. К., Носов Г. А. и др.* Процессы и аппараты химической технологии. М.: БИНОМ. 2014. 1758 с.

УДК 536.27 DOI: 10.37816/eeste-2024-1-59-62

МОДЕЛИРОВАНИЕ СОВМЕЩЕННОГО ТЕПЛОМАССООБМЕННО-ХИМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ОБЖИГА В ДВИЖУЩЕМСЯ СЛОЕ ДИСПЕРСНОГО РУДНОГО ФОСФАТНОГО СЫРЬЯ
MODELING OF COMBINED HEAT AND MASS TRANSFER-CHEMICAL FIRING PROCESS IN A MOVING LAYER OF DISPERSED ORE PHOSPHATE RAW MATERIALS

Владимир Александрович Орехов
Vladimir A. Orekhov

Филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске, Россия, Смоленск
Branch of the National Research University Moscow Power Engineering Institute in Smolensk, Russia, Smolensk
(e-mail: fundukoff@mail.ru)

Аннотация: Представлены математическая и физическая модели сложного совмещенного тепломассообменно-химического процесса обжига в движущемся слое дисперсного рудного фосфатного сырья на конвейере обжиговой машины, с учётом условий протекания гетерогенных процессов диссоциации карбонатных включений в его структуре.

Abstract: Considered mathematical and physical models of a complex combined heat and mass transfer-chemical firing process in a moving layer of dispersed ore phosphate raw materials on the conveyor of a firing machine are presented, considering the conditions of heterogeneous dissociation processes inclusions of carbonate.

Ключевые слова: процесс обжига, фосфатное сырье, диссоциация карбонатов.
Keywords: firing process, phosphate raw materials, dissociation of carbonates.

Эффективность протекания сложного совмещенного тепломассообменно-химического процесса (СТМХП) обжига дисперсного рудного сырья в движущемся на конвейере обжиговой машины плотном слое засыпки определяется условиями протекания гетерогенных процессов в составляющих его элементах.

Элементом плотного слоя является зерно рудного сырья, которое имеет, в общем случае, произвольную форму. Анализ протекания и развития гетерогенного процесса диссоциации карбонатных включений в структуре рудных зерен неправильной формы представляет из себя весьма трудновыполнимую задачу. Поэтому для решения методических и практических задач описания поведения материалов в плотном слое засыпки в целом, элементарные зерна могут быть представлены простыми формами [1,2]. В технологические расчёты необходимо вводить поправки, которые будут учитывать параметры реального плотного слоя дисперсного рудного сырья, такие как порозность, эффективная поверхность, воздухопроницаемость и прочие, что позволит использовать разработанные модели для решения технических задач с достаточной точностью для практических целей.

Для построения математической модели, на основе которой будут проводиться последующие численные расчёты параметров исследуемого сложного СТМХП обжига в плотном слое засыпки дисперсного сырья, необходимо сперва предложить структуру физической модели. Из системы горизонтальных плоских ячеек толщиной ΔY будет собран горизонтальный плотный слой рудного дисперсного материала толщиной Z. Количество горизонтальных ячеек определяется высотой слоя засыпки и определяется как k. Данные ячейки, в свою очередь, представлены набором, состоящим из количества пластин m с толщиной $2P$, которые являются моделью элементарных зерен термически активируемых карбонатных включений. Толщина пластин $2P$ выбирается исходя из реальных размеров

фракций исследуемого дисперсного сырья. Показатель порозности ε определяет число пластин в ячейке: $m = \Delta Y / 2P(1-\varepsilon)$. Вертикальные размеры размеры составляющих плотный слой элементов возможно выбрать произвольными, при условии выполнения: $Z = \sum_{i=1}^{k} \Delta Y_i$. В границах прохождения греющим газом одной ячейки, температура проходящего через её структуру теплоносителя не изменяется, теплоперенос в результате теплопроводности слоя будет считаться пренебрежимо малым. Изменение температуры газа будет происходить только при переходе между соседними элементарными выбранными ячейками. [3, 4].

Предложенная для проведения имитационного моделирования протекания СТМХП в дисперсном плотном слое рудного сырья физическая модель, позволяет использовать, с учётом допущений, для решения задач кинетики и внутренних задач теплообмена СТМХП обжига дисперсного рудного сырья, с учетом реакции диссоциации карбонатных включений в элементарном рудном зерне, математическую модель вида:

$$\begin{cases} \rho C_p\left(T, \alpha_W, \alpha_1, \alpha_2\right)\partial T/\partial \tau = \partial/\partial x\left(\lambda(T)\partial T/\partial x\right) - \left(C_1^0 Q_1^0\, \partial\alpha_1/\partial\tau + C_2^0 Q_2^0\, \partial\alpha_2/\partial\tau + W^0 Q_W^0\, \partial\alpha_W/\partial\tau\right); \\ \partial\alpha_1/\partial\tau = k_{01}\exp\left(-E_1/RT\right) f_1(\alpha_1); \\ \partial\alpha_2/\partial\tau = k_{02}\exp\left(-E_2/RT\right) f_2(\alpha_2); \\ \partial\alpha_W/\partial\tau = k_{0W}\exp\left(-E_W/RT\right) f_W(\alpha_W). \end{cases} \quad (1)$$

С начальными условиями вида:

$$T(x,0) = T_0; \quad \alpha_1(x,0) = 0; \quad \alpha_2(x,0) = 0; \quad \alpha_W(x,0) = 0; \quad (2)$$

и граничными условиями вида:

$$\lambda(T)\left(\partial T/\partial x\right)_{x=P} = K_F\left(T_\text{г} - T\right)_{x=P}; \quad \left(\partial T/\partial x\right)_{x=0} = 0, \quad (3)$$

где: α – степень превращения, а именно отношение $\alpha = 1 - G(\tau)/G_0$, включающее в себя: $G(\tau)$ – количество не вступившего в реакцию карбонатного вещества за время τ, G_0 – количество вступающего в реакцию карбонатного вещества , α_1 - степень реагирования карбонатов магния, α_2 - степень реагирования карбонатов кальция. Реакции разложения соответствующих карбонатов возможно записать в виде: $MgCO_3 \rightarrow MgO + CO_2 - Q_1^0$, где $Q_1^0 = 1,21 \cdot 10^5$ Дж/кг – эндотермический эффект, возникающий при разложении карбоната магния, и $CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2 - Q_2^0$, где $Q_2\, Q_2^0 = 1,78 \cdot 10^5$ Дж/кг – эндотермический эффект, возникающий при разложении карбоната кальция. C_1^0 и C_2^0 - значения концентрации карбонатных реагирующих включений $MgCO_3$ и $CaCO_3$ до начала реакции; k_{01} и k_{02}- предэкспоненциальный множители, E_1, E_2 – энергии активации реакции термической диссоциации карбонатов. Для описания процесса удаления влаги, протекающего по аррениусовскому закону примем: Q_W^0 – удельная теплота образования пара, k_{0W} – предэкспоненциальный множитель, E_W – энергия активации процесса удаления влаги, W^0 – начальное содержание влаги, α_W – степень дегидратации. Вид функции $f_{1,2,w}\left(\alpha_{1,2,w}\right)$ принимается известным где: λ – удельная теплопроводность, x – координата по толщине пластины с полутолщиной P, $x \in [-P; P]$, R – универсальная газовая постоянная, ρ – плотность материала, T – значение температуры. Возможно записать выражение для объемной теплоемкости, которая зависит от степеней превращения термически активируемых компонентов и значений температуры:

$$\rho C_p\left(T,\alpha_W,\alpha_1,\alpha_2\right)=\rho C_p\left(T\right)^o+\left[\rho C_p\left(T\right)^c-\rho C_p\left(T\right)^o\right]\left(1-\alpha_\Sigma\right)+\rho C_p\left(T\right)\left(1-\alpha_W\right) \quad (4)$$

где $\alpha_\Sigma=0.5\left(\alpha_1+\alpha_2\right)$ — суммарная степень реагирования, $\rho C_p\left(T\right)^c$, $\rho C_p\left(T\right)^o$ – температурные зависимости объёмной теплоёмкости полностью обработанного материала, где выполняется равенство $\alpha_1=\alpha_2=1$ и необработанного, при котором $\alpha_1=\alpha_2=0$. Теплоёмкость представляет функцию линейного вида, это обусловлено аддитивным свойством теплоёмкости смеси компонентов, при котором суммарная теплоёмкость составляющих смеси равна сумме составляющих ее компонентов. Заданием переменных во времени скорости греющего газа на полное сечение аппарата термической подготовки $\omega_\text{г}=\omega_\text{г}\left(\tau\right)$ и температур газа на входе в слой $\left(T_\text{г}\right)_{y=0}=T_\text{г}\left(\tau\right)$ могут быть воспроизведены условия нагрева плотного дисперсного слоя засыпки рудного фосфатного сырья в аппарате термической подготовки.

Для расчёта распределения по высоте слоя засыпки температуры греющего газа используется зависимость вида:

$$\omega_\text{г}\left(\tau\right)\rho_\text{г}\left(T\right)C_{p\text{г}}\left(T\right)dT_\text{г}/dy=Q, \quad (5)$$

где: Q – количество теплоты воспринимаемое плотным слоем дисперсного рудного сырья, определяемое из решения внутренней задачи теплообмена пластины, с принятой толщиной $2P$, которое включает в себя тепловую энергию, расходуемую на нагрев и покрытие эндотермических эффектов гетерогенных превращений в структуре материала: $Q=\int_0^{2P}\left(\rho C_p\left(T\right)\frac{dT}{d\tau}+Q_1^0C_1^0\frac{\partial\alpha_1}{\partial\tau}+Q_2^0C_2^0\frac{\partial\alpha_2}{\partial\tau}+Q_W^0W^0\frac{\partial\alpha_W}{\partial\tau}\right)dx$. В конечных разностях уравнение (5) примет вид:

$$\omega_\text{г}\left(\tau\right)\rho_\text{г}\left(T\right)C_{p\text{г}}\left(T\right)\left(T_{\text{г}\,i}-T_{\text{г}\,i-1}\right)/\Delta Y_i=Q_i,, \quad (6)$$

где Q_i определяется с учётом согласно принятой физической модели:

$$Q_i=\frac{\Delta Y_i}{2X}\left(1-\varepsilon\right)\int_0^{2P}\left(\rho C_p\left(T\right)\frac{dT}{d\tau}+Q_1^0C_1^0\frac{\partial\alpha_1}{\partial\tau}+Q_2^0C_2^0\frac{\partial\alpha_2}{\partial\tau}+Q_W^0W^0\frac{\partial\alpha_W}{\partial\tau}\right)dx.$$

Выражение (6) используется для определения температур греющего газа в слое: $T_{\text{г}\,i}=T_{\text{г}\,i-1}+Q_i\,\Delta Y_i/\omega_\text{г}\left(\tau\right)\rho_\text{г}\left(T\right)C_{p\text{г}}\left(T\right).$

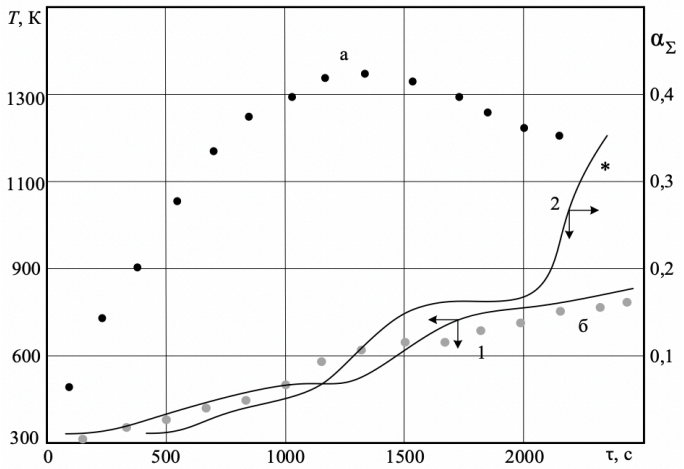


Рисунок 2 — Сопоставление результатов численных расчётов с натурным экспериментом на обжиговой конвейерной машине: а, б — экспериментально измеренные температуры газа на входе и выходе из плотного слоя дисперсной засыпки , * — степень декарбонизации по результатам химического анализа, 1 — рассчитанная температура газа на выходе из слоя, 2 — рассчитанная средняя по слою степень диссоциации карбонатных включений.

Для валидации результатов математического моделирования и проверки точности предложенной модели теплообмена в движущемся плотном слое дисперсного рудного материала, были проведены сравнения результатов численных расчетов с данными, полученными в результате обследования действующих обжиговых машин, рисунок 1.

Совпадение рассчитанных по предложенной математической модели и полученных посредством натурного эксперимента данных [5], свидетельствует о корректном учёте основных параметров и характеристик гетерогенных реакций диссоциации карбонатных включений в плотном слое засыпки дисперсного сырья в процессе динамического режима обжига рудных фосфатных материалов.

Выводы

Сопоставление численных решений, полученных в результате расчета по предложенной математической модели с данными проведенных натурных экспериментов, свидетельствуют о достаточном качественном и количественном соответствии результатов, что дает возможность утверждать, что описанная математическая модель является корректной. Построение компьютерной модели, реализующей предложенную математическую модель совмещенного тепломассообменно-химического процесса обжига дисперсного материала в плотном слое засыпки, может способствовать стратегии поиска энергоресурсоэффективных режимов функционирования обжигового оборудования за счёт интенсификации тепломассообменных процессов при высокотемпературной термической подготовке дисперсного сырья с термически активируемыми реагирующими включениями.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 22-11-00335.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. A. Bobkov, M. I. Dli, Y. B. Rubin. Influence of the conditions of internal heat exchange on the process of thermal decomposition of carbonates in iron ore raw materials // CIS Iron and Steel Review. 2022. Vol. 24. pp. 4–8.

2. Рудобашта С.П. Массоперенос в системах с твердой фазой. М.: Химия, 1980. 248с.

3. Мешалкин В. П. Организация ресурсосберегающих производственных систем нефтегазохимического комплекса // В. П. Мешалкин, А. И. Шинкевич, А. А. Лубнина. Курск. 2021. 188 с. ISBN 978-5-907512-58-0. EDN CNTQKF.

4. Пучков А. Ю., Лобанева Е. И., Култыгин О. П. Алгоритм прогнозирования параметров системы переработки отходов апатит-нефелиновых руд // Прикладная информатика. 2022. Т.17. №1(97). С.55–68.

5. Казов М. Н., Жуманова З. С., Кадырбеков Р. Н. Декарбонизирующий обжиг фосфоритов в шахтной печи // Мат-лы конф. МАХТ. Чимкент. 1980. Т.1. с.264.

УДК 544.012+ 544.3.032.3 DOI: 10.37816/eeste-2024-1-63-66

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ЭНТАЛЬПИЙ ПАРООБРАЗОВАНИЯ БИНАРНЫХ СМЕСЕЙ
COMPARISON OF VAPORIZATION ENTHALPIES CALCULATION METHODS OF BINARY MIXTURES

Дмитрий Антонович Рыжкин, Валентина Михайловна Раева, Елена Вячеславовна Рытова
Dmitry A. Ryzhkin, Valentina M. Raeva, Elena V. Rytova

МИРЭА — Российский технологический университет. (Институт тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова), Россия, Москва
MIREA — Russian Technological University, Institute of Fine Chemical Technologies named after M. V. Lomonosov, Russia, Moscow
(e-mail: dima-ryzhkin@mail.ru)

Аннотация: проведено сравнение экспериментальных и расчетных значений энтальпий парообразования бинарных зеотропных систем в изотермических условиях парожидкостного равновесия

Abstract: a comparison of experimental and calculated data of vaporization enthalpies binary zeotropic systems is carried out at isothermal vapor-liquid equilibrium

Ключевые слова: энтальпия парообразования смеси, зеотропные системы, спирт, равновесие жидкость – пар

Keywords: vaporization enthalpy of mixture, zeotropic systems, alcohol, vapor – liquid equilibrium

Данные по энтальпиям парообразования веществ и смесей используются для расчетов тепловых балансов химико-технологического оборудования. Прямые калориметрические измерения энтальпий парообразования смесей (H_V) являются сложными и трудоемкими процедурами. Поэтому применяются разные методы расчета H_V, учитывающие их зависимость состава и температуры [1, 2]. Предпочтение отдается термодинамическим методам расчета $H_V\ (x,\ T)$ [3-5].

Сравнение результатов расчетов по разным методам возможно только при наличии массивов экспериментальных данных $H_V\ (x,\ T)$ [3].

Автором [3] предложен строгий термодинамический метод расчета молярных энтальпий парообразования смесей по данным парожидкостного равновесия. Для условий ректификационного разделения показана возможность расчета молярных энтальпий парообразования бинарных смесей по данным фазового равновесия жидкость – пар [4]:

$$H_V = \frac{dP}{dT}\frac{RT^2}{P} \qquad (1)$$

где P – давление, T – температура. Процедура расчета dP/dT (2) по результатам математического моделирования равновесия жидкость – пар бинарной системы описана нами ранее [4]:

$$\frac{dP}{dT} = \sum_{i=1,2}\left(\frac{dP_i^0(T)}{dT}x_i\gamma_i(x,T) + P_i^0(T)x_i\frac{d\gamma_i(x,T)}{dT}\right) = \sum_{i=1,2}x_i\left(\frac{dP_i^0(T)}{dT}\gamma_i(x,T) + P_i^0(T)\frac{d\gamma_i(x,T)}{dT}\right) \qquad (2)$$

Здесь Pi^0 − давление насыщенного пара компонента *i* при равновесной температуре кипения, γ_i − коэффициент активности компонента *i* в жидкой фазе,

Для моделирования фазового равновесия жидкость – пар применяют разные уравнения [2]. В работе [3] данные H_V для зеотропных и азеотропных составов рассчитывали в изобарических и изотермических условиях фазового равновесия, по модели UNIFAC. Для полного диапазона составов азеотропной системы бензол – циклогексан моделирование фазового равновесия в изобарических условиях проводили по уравнению NRTL [4].

В представляемой работе проведено сравнение методов расчета молярных энтальпий парообразования бинарных зеотропных смесей в изотермических условиях парожидкостного равновесия. Молярные энтальпии парообразования определяли по данным фазового равновесия (NRTL, UNIFAC) и по массивам теплофизических свойств чистых компонентов.

1. H_V определяли как разность молярных энтальпий пара (H^V) и жидкости (H^L):

$$H_V = H^V - H^L \,. \tag{3}$$

Фазовые равновесия рассчитывали по моделям. Для индивидуальных компонентов давления насыщенных паров и молярные энтальпии парообразования веществ (H^0_{Vi}) определяли по разным корреляционным уравнениям:

$$\ln P_i^0 = C_{1i} + \frac{C_{2i}}{T + C_{3i}} + C_{4i}T + C_{5i}\ln T + C_{6i}T^{C_{7i}} \tag{4}$$

$$H_{Vi}^0(T) = H_{Vi}^*(T_1)\left(\frac{1 - {}^{T}/_{T_{ci}}}{1 - {}^{T_1}/_{T_{ci}}}\right)^{a_i + b_i\left(1 - {}^{T}/_{T_{ci}}\right)} \tag{5}$$

Здесь T_{ci} – критическая температура компонента *i*, T_1 − температура, для которой известно экспериментальное значение энтальпии парообразования H^*_V, T − температура, для которой проводится расчет H^0_{Vi}. Параметры a_i, b_i, коэффициенты C_{1i}-C_{7i} и критические температуры взяты из базы данных NIST [6].

2. Расчет H_V по данным парожидкостного равновесия (1). При допущении идеального поведения паровой фазы величины Pi^0 и H^0_{Vi} определяли по уравнению Антуана (6) [2]:

$$ln\, P_i^0 = A_i - \frac{B_i}{T + C_i} \tag{6}$$

$$H_{Vi}^0 = \frac{dP_i^0}{dT}\frac{RT^2}{P_i^0} \tag{7}$$

$$\frac{dP_i^0}{dT} = P_i^0\frac{B_i}{(T + C_i)^2} \tag{8}$$

Таким образом, расчет H_V проводится с одним набором коэффициентов (A_i, B_i, C_i) с учетом термодинамических соотношений (1), (7).

3. Альтернативная методика определения $H_V(x)$ по теплофизическим свойствам чистых веществ [5, 7]. Вводятся допущения: тепловые эффекты смешения в жидкой фазе, и, соответственно, избыточная составляющая молярной энтальпии парообразования отсутствуют, энтальпия парообразования смеси не зависит от давления:

$$H_V = xH_{V1}^0 + (1 - x)H_{V2}^0 - x\Delta C_{p1}(T - T_1^0) + (1 - x)\Delta C_{p2}(T_2^0 - T) \tag{9}$$

Здесь T_1^0, T_2^0 − температуры кипения веществ, $\Delta C_{p1} = C_{p1}^L - C_{p1}^V$ – разность средних теплоемкостей жидкости и пара низкокипящего компонента в интервале температур $T \div T_1^0$, $\Delta C_{p2} = C_{p2}^L - C_{p2}^V$ – разность средних теплоемкостей жидкости и пара высококипящего компонента 2 в интервале температур $T \div T_2^0$. В отличие от расчетов H_V по данным фазового равновесия, требуются массивы данных по изобарным теплоемкостям компонентов в жидкой и паровой фазах.

Цель работы – сравнение результатов расчета молярных энтальпий парообразования бинарных зеотропных смесей спиртов при T=const. Для моделирования фазового равновесия

жидкость – пар использовали уравнения NRTL и UNIFAC, а также различные массивы теплофизических данных по свойствам индивидуальных веществ.

Расчеты парожидкостного равновесия проводили по уравнению NRTL с параметрами, приведенными в таблице 1: $\tau_{ij} = a_{ij} + \frac{b_{ij}}{T}$, $G_{ij} = \exp(-\alpha\tau_{ij})$.

Таблица 1 — Параметры уравнения NRTL

Система i-j	a_{ij}	a_{ji}	$в_{ij}$	$в_{ji}$	c_{ij}
Пропанол-1 - изобутанол	-0.9938	0.7331	111.8673	65.5903	0.3
Пропанол-1 - изоамиловый спирт	-3.6591	2.7404	1510.557	-1137.01	0.3
Изобутанол - изоамиловый спирт	0	0	499.9104	-323.526	0.3

Экспериментальные и расчетные значения H_V представлены в таблице 2, относительные ошибки расчета ΔH_V – в таблице 3:

$$\Delta H_V = \frac{H_V^{\text{эксп}} - H_V^{\text{расч}}}{H_V^{\text{эксп}}} * 100\% \quad (10)$$

Таблица 2 — Молярные энтальпии парообразования бинарных смесей спиртов при 333.15 К.

Смесь 1−2	*Hv,* кДж/моль						
	Данные [3]			Собственные расчетные данные			
	x_1, мол. д.	Эксп.	UNIFAC	Метод 1		Метод 2	Метод 3
				NRTL	UNIFAC	NRTL	
Пропанол-1 - изобутанол	0.1	48.1	46.8	47.3	47.4	48.1	45.2
	0.5	47	46.4	46.0	46.4	46.5	44.6
	0.9	46.2	46.1	45.2	45.3	45.8	43.9
Пропанол-1 - изоамиловый спирт	0.1	53.7	50.8	52.1	51.9	51.3	53.1
	0.5	47.9	47.3	49.4	48.8	47.4	49.0
	0.9	46.7	46.2	46.0	45.8	45.9	44.8
Изобутанол - изоамиловый спирт	0.1	55.4	51.7	52.3	52.1	52.5	53.3
	0.5	50.9	48.6	50.4	50.2	50.3	49.8
	0.9	49.1	47.2	48.2	34.5	49.1	46.3

Таблица 3 — Относительные ошибки расчета молярных энтальпий парообразования смесей спиртов при 333.15 К.

Смесь 1−2	x_1, мол. д.	ΔH_V, %				
		UNIFAC [3]	Метод 1		Метод 2	Метод 3
			NRTL	UNIFAC	NRTL	
Пропанол-1 - изобутанол	0.1	2.6	1.7	1.4	-0.1	5.9
	0.5	1.3	2.1	1.3	1.0	5.1
	0.9	0.3	2.1	1.9	0.9	5
	$\overline{\Delta}$	1.4	2	1.5	0.6	5.4
Пропанол-1 - изоамиловый спирт	0.1	5.4	3	3.4	4.5	1.1
	0.5	1.2	-3.1	-2.0	1.0	-2.2
	0.9	1.1	1.6	1.9	1.8	4.1
	$\overline{\Delta}$	2.6	2.6	2.4	2.4	2.5
Изобутанол - изоамиловый спирт	0.1	6.7	5.7	5.9	5.3	3.8
	0.5	4.6	0.9	1.4	1.2	2.2
	0.9	3.9	1.7	29.7	-0.1	5.7
	$\overline{\Delta}$	5.1	2.8	12.3	2.2	3.9

Абсолютные значения средних ошибок ($\overline{\Delta}$) для смесей пропанол-1 – изобутанол, пропанол-1 – изоамиловый спирт и изобутанол – изоамиловый спирт составляют 1.4, 2.6 и

5.1 % соответственно. Расчеты по данным теплоемкости в фазах (9) для тех же систем обеспечивают наименее точные результаты: 5.4, 2.5 и 3.9 %.

Рекомендуется использовать для расчетов молярных энтальпий парообразования модель NRTL, поскольку значения абсолютных средних ошибок по методу 1 (2, 2.6, 2.8 %) и методу 2 (1.5, 2.4, 2.2 %) ниже, чем по UNIFAC.

Вывод

Наиболее точное воспроизведение экспериментальных данных по молярным энтальпиям парообразования смесей спиртов при 333.15 К достигнуто при использовании термодинамического метода расчета по данным парожидкостного равновесия (метод 2).

Работа выполнена при финансовой поддержке Гранта Государственного задания № FSFZ - 2023-0003.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арутюнов Б.А., Арутюнов А.Б. Термодинамика и свойства веществ. // Московский технологический университет. Москва, 2016. 241 с.

2. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей. / Пер. с англ. под ред. Соколова Б.И. Изд. 3-е. Химия. Ленинград, 1982. 592 с.

3. Tamir A. Prediction of latent heat of vaporization of multicomponent mixtures. // Fluid Phase Equil. 1982 V. 8. № 2. P.131-147. https://doi.org/10.1016/0378-3812(82)80031-9

4. Raeva V.M., Anisimov A.V., Ryzhkin D.A. Calculation of vaporization enthalpies of a benzene – cyclohexane system. // Russ. Chem. Bull. 2021. V. 70. № 4. P**.** 715-721). https://doi.org/10.1007/s11172-021-3141-3

5. Арутюнов Б.А., Эльсадиг Мохаммед Ю.А. Термодинамический метод расчета теплоты парообразования бинарных смесей. // Вестник МИТХТ. 2010. Т. 5. №5. С. 36-39

6. Standard Reference Database of National Institute of Standards and Technology (NIST), Number 69. 2022. https://doi.org/10.18434/T4D303

7. Арутюнов Б.А., Эльсадиг Мохаммед Ю.А., Аушева Е.В. Температурная зависимость теплоты парообразования чистых углеводородов и их бинарных смесей. // Вестник МИТХТ. 2010. Т. 5. № 5. С. 40-42.

УДК 004.942:665.658.62 DOI: 10.37816/eeste-2024-1-67-71

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ СЫРЬЯ И ПЕРСПЕКТИВНЫХ РЕАКТОРНЫХ БЛОКОВ УСТАНОВКИ ГИДРООЧИСТКИ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА
DEVELOPMENT OF A MODEL OF RAW MATERIALS AND ADVANCED REACTOR UNITS OF A DIESEL FUEL HYDROTREATING PLANT

Наум Александрович Самойлов
Naum A. Samoilov

ООО Научно Исследовательский Проектный Институт нефти и газа «ПЕТОН» , Россия, Уфа
LLC Research and Design Institute of Oil and Gas «PETON», Russia, Ufa
(e-mail: naum.samoilow@yandex.ru)

Аннотация: Разработаны модель дизельного топлива и математическая модель процесса его гидроочистки, на основе которых предложены два варианта реакторных блоков установки гидроочистки.

Abstract: A model of diesel fuel and a mathematical model of its hydrotreating process have been developed, on the basis of which two variants of reactor units of a hydrotreating plant have been proposed

Ключевые слова: математическое моделирование реакторов, гидроочистка дизельного топлива, псевдокомпоненты, критерий оптимальности.

Keywords: mathematical modeling of reactors, hydrotreating of diesel fuel, pseudo-components, optimality criterion.

С позиций математического моделирования среди крупнотоннажных каталитических процессов нефтепереработки гидроочистка дизельного топлива является особенно проблемной в силу нескольких сотен одновременно протекающих реакций гидродесульфуризации целого ряда гомологических рядов сераорганических примесей меркаптанов, сульфидов, дисульфидов, тиофенов, бензотиофенов, дибензотиофенов с существенно различной каталитической активностью. Часто при разработке и анализе эффективности новых катализаторов для гидроочистки дизельного топлива в качестве сырья ограничиваются бинарными модельными смесями химически чистых углеводорода и сераорганического компонента, обычно из ряда бензотиофенов или дибензотиофенов [1]. Большое число сераорганических компонентов в сырье гидроочистки препятствует созданию достаточно полной модели химизма, так в [2] для описания процесса гидродесульфуризации флюида каталитического крекинга, протекающего по 444 отдельным стадиям, рассматривалось упрощение модели сырья, в частности, за счет сокращения промежуточных реакций. Многочисленны попытки решения проблемы формирования адекватного представления сырья в виде достаточно простой модели. С этой целью часто тем или иным способом условно группируют множество реагирующих сераорганических компонентов в один условный компонент (lump — сгусток) или псевдокомпонент со свойствами достаточно близкими свойствам этой группы [3–5], При разработке формальных математических моделей процесса гидроочистки дизельного топлива такие группы порой просто характеризуются, например, как легкогидрируемые и трудногидрируемые. Например, в работе [4], рассматривая исходное сырье гидроочистки по трем типам сераорганических соединений (первый тип — соединения серы, включающие тиолы, сульфиды и тиофены, второй тип — бензотиофен и бензотиофены с алкильными заместителями, и третий тип — дибезотиофен и дибензотиофены с алкильными заместителями,), авторы в ходе моделирования процесса гидродесульфуризации топлива делили эти примеси достаточно произвольно на 2, 3 или 4 псевдокомпонента. Можно предполагать, что это деление было выполнено недостаточно

корректно, поскольку лучший результат математического моделирования был получен при делении примесей на три псевдокомпонента, хотя следовало ожидать лучший результат моделирования на основе четырех псевдокомпонентов, аналогично исследованию [5], показавшему, что уровень адекватности модели возрастает с числом используемых псевдокомпонентов, в частности, модели с шестью псевдокомпонентами эффективнее, чем с четырьмя.

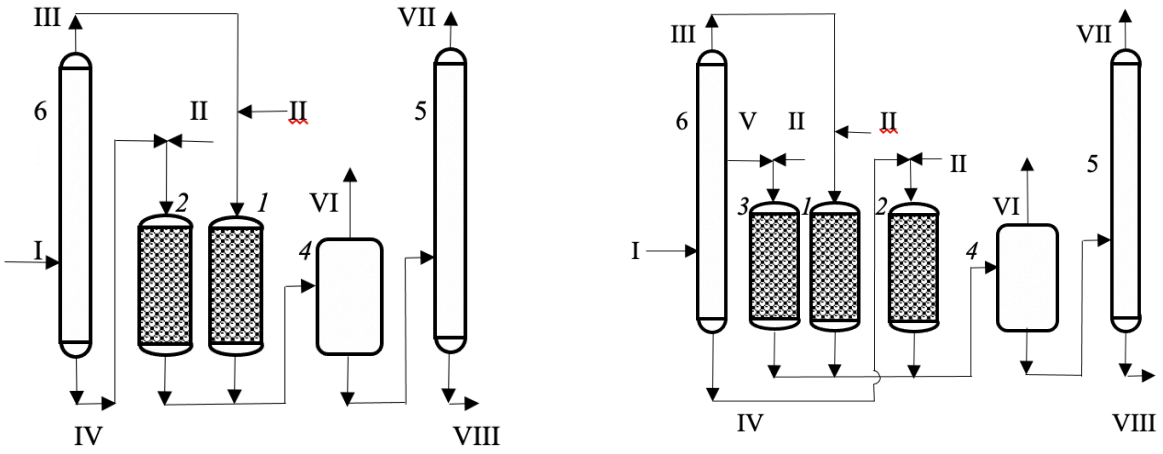
Несмотря на то, что характерные реакционные узлы промышленных установок гидроочистки довольно разнообразны и могут быть представлены единичным реактором, системой от двух до восьми последовательно работающих реакторов, системой нескольких параллельно работающих реакторов и смешанной системой, например, вначале сырье подвергается частичной гидроочистке в двух параллельно работающих реакторах, а затем после них реакционная смесь доочищается совместно в третьем реакторе, анализ работы этик вариантов реакторных блоков показал, что при равных входных параметрах (производительность, сырье, катализатор, технологический режим, степень очистки сырья от серы и т.д.) все реакторные блоки по объему загружаемого катализатора одинаковы и эквивалентны работе одного крупного реактора [6], свидетельствуя о бесперспективности существующих схем процесса. Однако впервые в статье [7] в ходе анализа процесса гидроочистки прямогонной дизельной фракции 180–360ºС была выдвинута гипотеза о том, что разницу в реакционной способности отдельных сераорганических классов и компонентов сырья гидроочистки можно в принципе можно использовать для интенсификации промышленного процесса: «Поскольку во фракции, выкипающей при температуре более 300^0С сосредоточены, в основном, трудногидрируемые замещенные сернистые ароматические соединения, то можно предположить, что при раздельном гидродеобессеривании фракций 180–300ºС и 300–360ºС совокупная степень превращения превысит степень превращения фракции 180–360ºС». При этом предложенное разделение исходного сырье на две части являлось достаточно произвольным и не был сформулирован критерий, объективно обеспечивающий логику принципа разделения сырья.

В связи с этим нами [8] была предложена модель сырья гидроочистки как локализованный последовательный ряд из n узких фракций с объединением совокупности сераорганических примесей в каждой фракции в виде псевдокомпонента, что позволяет в ходе математического моделирования процесса гидроочистки выяснить в каких фракциях сырья в данный момент времени процесс десульфуризации уже завершился, а в каких гидроочистка еще продолжается. Таким образом, при реализации реального процесса гидроочистки можно предварительно обосновано разделить сырье на две широкие фракции, для которых требуется различная продолжительность гидродесульфуризации слагающих их узких фракций с последующей реализацией раздельного гидрирования каждой широкой фракции в самостоятельном реакторе, формируя реакторный блок, то есть реализовать дифференциальную гидроочистку сырья (рисунок.1а).

Для определения оптимальных температурных границ деления сырья на широкие фракции в качестве критерия оптимальности R предлагается минимум суммарной загрузки катализатора в двухреакторный блок дифференциальной гидроочистки:

$$R = \sum_{i=1}^{i=Z} \frac{G_{Fi} \ln \frac{C_{S0i}}{C_{Siend}}}{R1_{F/C} k_i} + \sum_{i=Z+1}^{i=n} \frac{G_{Fi} \ln \frac{C_{S0i}}{C_{Siend}}}{R2_{F/C} k_i} = \min, \qquad (1)$$

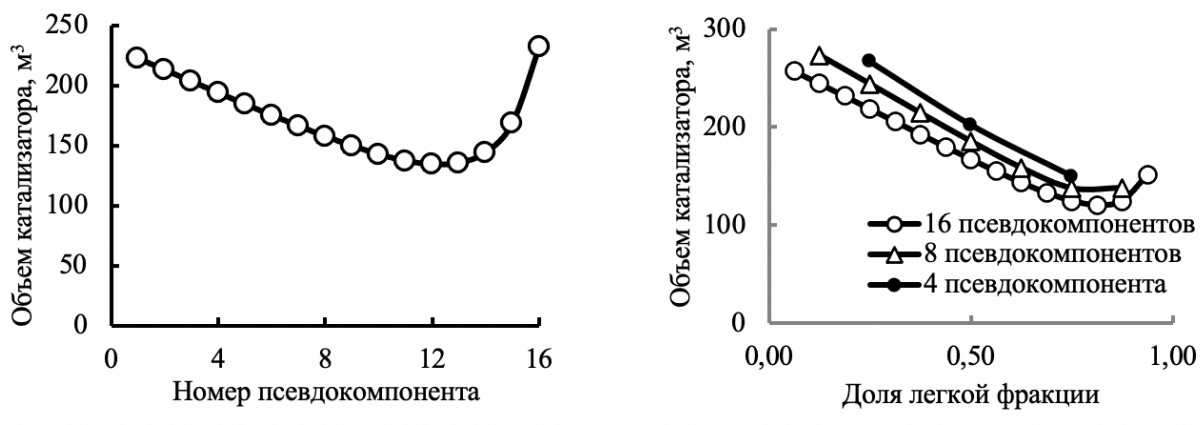
где Z – число узких фракций в сырье первого реактора, формирующих легкую широкую фракцию; G_{Fi} – расход i-й узкой фракции м^3/ч; C_{S0i} – начальная концентрация общей серы (i-го псевдокомпонента) в i-й узкой фракции перед гидроочисткой, мг/кгv; C_{Siend} – конечная концентрация общей серы (i-го псевдокомпонента) в i-й узкой фракции после гидроочистки, мг/кг; k_i – эффективная константа скорости реакции гидродесульфуризации i-го псевдокомпонента в i -й узкой фракции, ч$^{-1}$; $R1_{F/C}$ и $R2_{F/C}$ – соответственно удельная объемная производительность катализатора в первом и втором реакторах, м^3 сырья/м^3 катализатора в час.



а) б)

Рисунок 1 — Принципиальные схемы перспективных реакторных узлов установок дифференциальной гидроочистки дизельного топлива: двухреакторная (а) и трехреакторная (б)
Аппараты: 1– реактор R-1, 2 – реактор R-2, 3 – реактор R-3, 4 – сепаратор,
5 – стабилизатор, 6 – ректификационная колонна.
Потоки: I – исходное сырье, II– водородсодержащий газ (ВСГ), III – легкая широкая фракция сырья,
IV – тяжелая широкая фракция сырья, V – средняя широкая фракция сырья,
VI – рециркулирующий ВСГ, VII – углеводородный газ, VIII – очищенное дизельное топливо.

Во всех рассмотренных решениях задачи о двухреакторном блоке дифференциальной гидроочистки при любом разделении сырья на две широкие фракции загрузка катализатора в блок реакторов меньше, чем в традиционных схемах, причем для любого варианта сырья по распределению сераорганических примесей существует индивидуальная граница деления на две широкие фракции, при которой процесс протекает при минимальной загрузке катализатора существенно (на 30–40%) меньшей, чем в традиционном «единичном» реакторе (рисунок 2а). Таким образом, решение целевой функции (1) при поиске минимальной загрузки катализатора в двухреакторный блок является единственным. Достаточно точное решение задачи достигается при делении сырья на 16 или 8 узких фракций (рисунок 2б).



а) б)

Рисунок 2 — Зависимость объема катализатора, загружаемого в двухреакторный блок установки гидроочистки дизельного топлива, от номера псевдокомпонента на границе деления легкой и тяжелой фракций сырья (а) и доли легкой фракции в сырье, характеризуемом различным числом псевдоком понентов (б)

Анализ распределения псевдокомпонентов по реакторам Р-1 и Р-2 двухреакторного блока (рисунок 1а) при оптимальном режиме его работы показал, что загрузку катализатора в реактор Р-1 можно уменьшить, если убрать из легкой широкой фракции часть наиболее тяжелых псевдокомпонентов, также можно уменьшить загрузку катализатора в реактор Р-2, если убрать из тяжелой широкой фракции часть наиболее легких псевдокомпонентов. Такую схему гидроочистки можно реализовать, если дополнить реакторный блок третьим реактором Р-3, в который будет подаваться промежуточная третья (средняя) широкая фракция исходного сырья из средней части ректификационной колонны (рисунок 1б).

Интенсификация процесса гидроочистки дизельного топлива обеспечивается в первую очередь за счет использования предложенной модели сырья, позволившей детализировать и локализовать кинетику гидрогенизации узких фракций и учесть возможность снижения необходимого времени пребывания в реакторе значительной части исходного сырья, например, для достижения необходимой глубины очистки преобладающей легкой части сырья в первом реакторе достаточно время пребывания около 0.8 ч, тогда как для относительно небольшой тяжелой части время пребывания составляет 3.5 часа.

В таблице 1 приведены некоторые данные по результатам математического моделирования единичного реактора (эквивалент современных схем реакторных блоков установок гидроочистки) и блоков дифференцированной гидроочистки. производительностью 100 м3/ч, разделяемого в расчетах на 16 равных узких фракций. Дифференцированная гидроочистка на Co-Mo катализаторе обеспечивала снижение общей серы в гидрогенизате до 10 мг/кг при уменьшении загрузки катализатора в двухреакторном блоке на 30-40%, а в трехреакторном блоке на 50% по сравнению с современными промышленными установками гидроочистки.

Таблица 1 — Сопоставление результатов математического моделирования реакторных блоков

Параметры	Единичный реактор	Дифференциальная гидроочистка				
		двухреакторный блок		трехреакторный блок		
	R-1	R-1	R-2	R-1	R-3	R-2
Температурные границы широких фракций,°С	Сырье 180-360	180-315	315-360	180-303.7	303.7-348.7	348.7-360
Распределение псевдокомпонентов	1…16	1…12	13…16	1…11	12…15	16
Расход сырья, $м^3$/ч	100	75	25	68.75	25	6.25
Продолжительность контакта сырья с катализатором, ч	2.31	0.78	3.00	0.68	2.00	3.70
Объем катализатора в реакторе, $м^3$	231.7	59.0	75.2	46.6	23.1	49.7
Объем катализатора в реакторном блоке, $м^3$	231.7	**134.2**		**119.4**		

Если загрузку катализатора в рассматриваемой задаче принять равной 231.7 м3 для всех трех схем таблицы 1, то дифференцированная гидроочистка может позволить увеличить производительность установок гидроочистки для двух- и трехреакторных систем с 100 $м^3$/ч до 170 и 190 $м^3$/ч соответственно. Перспективные схемы дифференцированной гидроочистки защищены патентами [9, 10].

Выводы

Новый вариант модели сырья гидроочистки дизельного топлива от сераорганических примесей позволил учесть специфику полиреакционных систем с различной скоростью реакций гидродесульфуризации и разработать две схемы реакционных блоков дифференцированной гидроочистки, обеспечивающие оптимизацию процесса и более эффективных, чем традиционные схемы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jing Ren, Anjie Wang, Xiang Li, Yongying Chen, Haiou Liu, Yongkang Hu. Hydrodesulfurization of dibenzothiophene catalyzed by Ni-Mo sulfides supported on a mixture of MCM-41 and HY zeolite // Applied Catalysis A: General. 2008. V. 344 (1-2). P. 175–182.

2. Ghosh P., Andrewsand A.T., Quann R.Q., Halber T.R. Detailed kinetic model for the hydrodesulfurization of FCC // Naphtha. Energy Fuels. 2009. V. 23(12). P. 5743–5759.

3. Xun Nang, Shuyuan Li, Changtag Yue, Jilai He, Jili Hou. Lumping kinetics of hydrodesulfurization and hydrodenitrogenation of the middle distillate from chinese shale oil // Oil Shale. 2013. V. 30. N. 4. P. 517–535.

4. Papop Bannatham, Sornsawan Teeraboonchaikul, Tanaree Patirupanon, Wannarat Arkardvipart, Sunun Limtrakul, Terdthai Vatanatham, Palghat A. Ramachandran. Kinetic evaluation for hydrodesulfurization via lumped model in a trickle-bed reactor // Ind. Eng. Chem. Res. 2016. V. 55. N 17. P. 4878–4886.

5. Yachen Yin, Wenbin Chen, Guilian Wu, Feng Xin, Kang Qin, Yutao Lu, Le Zhang, Mingfeng Li. Kinetics towards mechanism for ultra-deep hydrodesulfurization and hydrodenitrogenation of diesel // AICHE Journal. 1922. V. 67. N 7. FirstPublished: 18 January 2021.

6. Самойлов Н.А. Математическое моделирование и оптимизация процесса гидроочистки дизельного топлива // ТОХТ. 2021. Т.55. №1. С. 99–109.

7. Логинов С.А., Лебедев Б.Л., Капустин В.М., Луговской А.И., Курганов В.М., Рудяк К.Б. Разработка новой технологии процесса гидрообессеривания дизельных топлив //Нефтепереработка и нефтехимия. 2001. №11. С. 67-74.

8. Samoilov N.A., Zhilina V.A. On the formation of organosulfur pseudo-components in the raw materials of the diesel fuel hydrotreating process // Progress in Petrochemical Science. 2020. V. 3. N 5. P. 800-801.

9. Пат. РФ 2691965 (опубл. 2019). Способ гидроочистки дизельного топлива.

10. Пат. РФ 2798566 (опубл. 2023). Способ гидроочистки дизельного топлива.

УДК 66.011 DOI: 10.37816/eeste-2024-1-72-75

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА МЕЖФАЗНОГО ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА В РАСПЫЛИТЕЛЬНОМ АППАРАТЕ ДЛЯ РЕЖИМОВ ПРЯМО- И ПРОТИВОТОКА ФАЗ
COMPARISON OF THE RESULTS OF CALCULATION OF INTERPHASE HEAT AND MASS TRANSFER IN A SPRAYING APPARATUS FOR FORWARD FLOW AND COUNTERFLOW OF PHASES

Николай Николаевич Симаков
Nikolai N. Simakov

Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны
Россия, Ярославль
Yaroslavl Higher Military School of Air Defense
Russia, Yaroslavl
(e-mail: nik_simakov@mail.ru)

Аннотация: Представлено сравнение результатов расчета тепло- и массообмена в распылительном аппарате в режимах прямо- и противотока фаз с использованием зависимости $C_d = 2000/\mathrm{Re}^2$ в предложенной раннее модели гидродинамики факела распыла и с учетом кризиса тепломассообмена фаз.

Abstract: A comparison of the results of calculation of heat and mass transfer in a spray apparatus in forward flow and counter flow of phases is presented by using the dependence $Cd = 2000/\mathrm{Re}^2$ in the previously proposed model of the hydrodynamics of the spray cone and taking into account the crisis of the interphase heat and mass transfer.

Ключевые слова: форсунка, распыливание жидкости, двухфазный поток, ранний кризис сопротивления капель, расчет межфазного тепло- и массообмена в аппарате.

Keywords: nozzle, liquid spraying, two-phase flow, early crisis of droplets drag, calculation of interphase heat and mass exchange in the apparatus.

Распыливание жидкости в газе с помощью форсунок широко используют в химических технологиях, энергетике, транспорте, обеспечении экологической защиты окружающей среды. Это делается с целью интенсификации тепломассообмена фаз путем увеличения поверхности их раздела при сушке и гранулировании полимеров, сжигании жидких топлив, мокрой очистке воздуха от пыли и вредных газовых примесей и т.п.

Актуальность данной работы также, как предыдущих [1, 2] по той же тематике, обоснована тем, что удовлетворительные методы расчета таких процессов разработаны еще недостаточно. Одна из причин этого заключается в том, что при расчете межфазного взаимодействия в сильно турбулентном потоке факела распыла обычно не учитывают такую существенную особенность, как возникновение *раннего кризиса сопротивления* капель, обнаруженное в эксперименте [3, 4].

Модель гидродинамики факела распыла с учетом раннего кризиса сопротивления капель, описанная в работе [5], была дополнена уравнениями, учитывающими тепло- и массообмен фаз, и позволила рассчитывать в согласии с опытными данными двухфазный поток с межфазным тепло- и/или массообменом [1, 2, 6, 7].

В работах [3, 4] для капель, движущихся по оси свободного факела, в качестве хорошего приближения при $40 < \mathrm{Re} < 110$ была получена формула

$$C_d = 2000/\mathrm{Re}^2. \quad (1)$$

В дальнейшем было показано, что эта зависимость справедлива не только на оси свободного факела, но и в других частях занимаемого им пространства.

Целью данной работы было продолжение исследований, описанных в вышеупомянутых работах, с устранением некоторых недостатков модели, например, при

выборе граничных условий. Для этого с использованием формулы (1) был выполнен новый расчет гидродинамики и межфазного тепломассообмена в распылительном аппарате и проведено сравнение результатов, полученных для прямо- и противоточного режимов его работы.

В качестве основы для описания и расчета гидродинамики факела распыла использовалась система уравнений (4) - (14) из книги [1, Sect. 7.2]. Для расчета межфазного тепло- и/или массообмена вышеуказанная система уравнений была дополнена другими соответствующими уравнениями (см. в [1, Sect. 7.3], [2] и [6, 7]).

Немалую трудность в построении численной модели представляет задание подходящих граничных условий, которые правильно отражали бы сущность моделируемого физического явления и сохраняли устойчивость разностной схемы.

Некоторые граничные условия для рассчитываемых величин очевидны и понятны. Например, на оси симметрии двухфазного потока (при $r = i\,\Delta r = 0$) радиальные скорости фаз $w_r = u_r = 0$. Здесь также могут обращаться в нуль производные по r от некоторых переменных: аксиальных компонент u_z и w_z скоростей фаз, их температур t_g и t_l, плотностей воздуха ρ и водяного пара ρ_v.

В данной работе на части верхней границы, находящейся внутри конуса распыления, значения w_z и w_r задавали по данным эксперимента, а на остальной части, используя “мягкие условия”, отличающиеся тем, что частная производная в направлении, перпендикулярном к границе, вычисляется по односторонним разностям. На части верхней границы расчетной области, находящейся внутри конуса распыления, значения компонент скорости жидкости и ее объемной доли α задавали по данным экспериментальных измерений в свободном факеле распыла на расстоянии $z = 100$ мм от форсунки, предполагая, что в верхнем сечении распылительного аппарата они останутся приблизительно такими же. На остальной части верхней границы значения каждой из компонент скорости жидкости, чтобы избежать разрыва, дополнили в виде функции, плавно спадающей по радиусу до нуля.

На всей верхней границе безразмерную плотность газа $\rho = 1$, начальную температуру жидкости t_{l0} и плотность насыщенного пара ρ_{sv} вблизи поверхности капель задавали постоянными, полагая, что это является наименьшим произволом при неизвестности действительных распределений этих величин.

На верхней границе в режиме прямотока начальные значения температуры газа t_{g0} и плотности пара ρ_{v0} в воздухе задавали постоянными, близкими к их значениям снаружи, вдали от аппарата. В режиме противотока таким же образом задавали эти величины на нижней, входной для газа, границе, а на верхней, выходной для газа, границе температуру газа t_g и плотность пара ρ_v в воздухе определяли, используя мягкие условия.

На боковой границе, совпадающей с цилиндрической внутренней поверхностью стенки аппарата, для компонент скорости жидкости u_z, u_r, ее температуры t_l и объемной доли α применялись мягкие условия. Для компонент скорости газа использовались “условия прилипания”: $w_r = w_z = 0$. Величины ρ_v и t_g определяли из мягких граничных условий.

На всей нижней границе расчетной области безразмерную плотность газа задавали постоянной $\rho = 1 + \Delta\rho$, где приращение $\Delta\rho$ связано с задаваемым перепадом давления ΔP газа на аппарате. Для остальных расчетных величин в случае прямоточного режима фаз применялись мягкие граничные условия.

Некоторые результаты расчета характеристик прямо- и противоточного режимов распылительного аппарата представлены на рис. 1−4. На рис. 1 показан график расчетной зависимости $\Delta P(V)$ между расходом V газа и перепадом его давления ΔP в аппарате радиусом $R = 200$ мм и высотой $H = 900$ мм в режимах прямотока ($V > 0$) и противотока ($V < 0$).

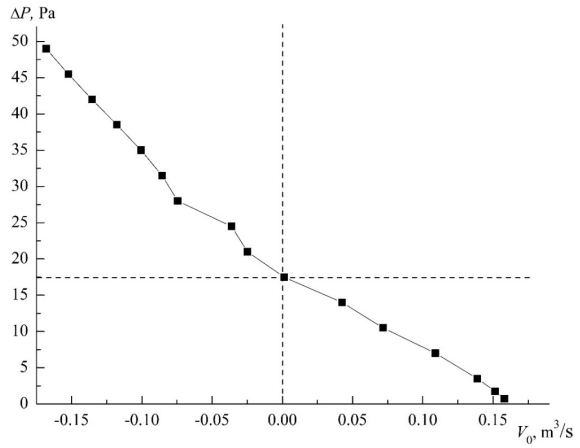


Рисунок 1 — Зависимость расхода V газа от перепада давления ΔP в аппарате.

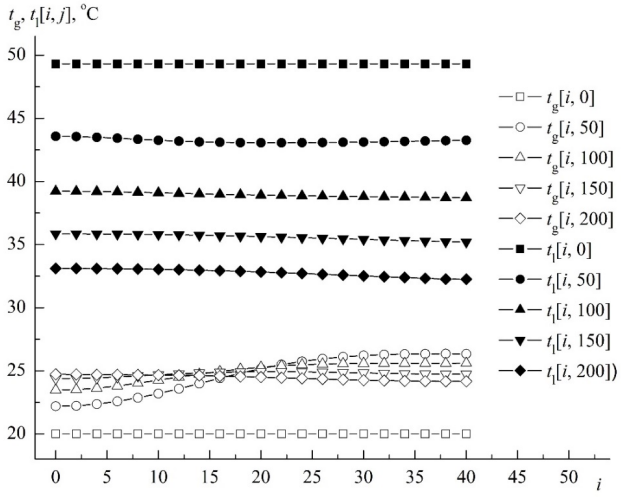


Рисунок 2 — Радиальные профили температур газа t_g и жидкости t_l на разных от форсунки расстояниях $z = 100 + 4j$ мм для прямотока.

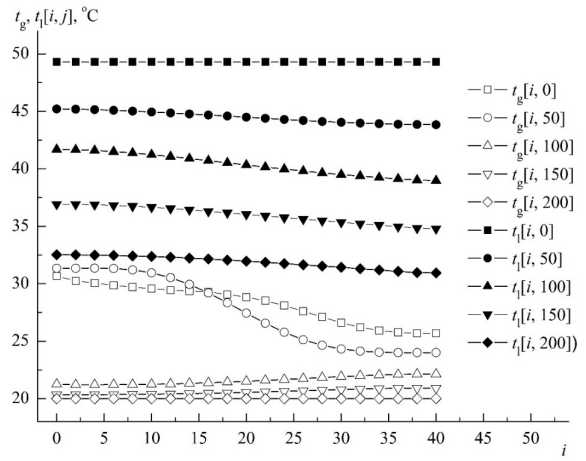


Рисунок 3 — То же, что на рис. 2, для противотока фаз.

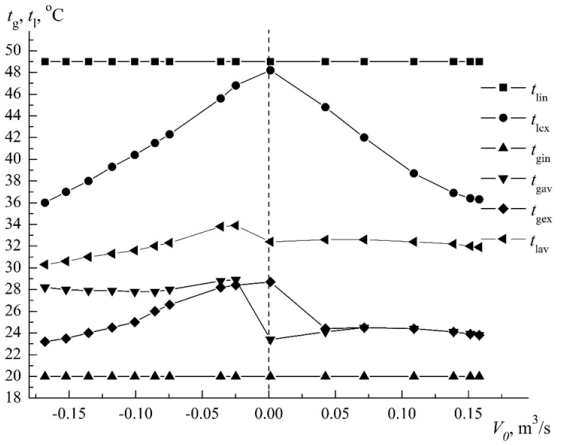


Рисунок 4 — Зависимости температур газа и воды на входе (дополнительный индекс in)в аппарат, на выходе (индекс ex) из него и для средних (индекс av) значений по выходному для данной фазы сечению аппарата от расхода газа.

На рис. 2 и 3 показаны радиальные профили температур фаз (по шкале Цельсия) на разных от форсунки расстояниях $z = 100 + 4j$ мм для режимов прямо- и противотока, соответственно. Очевидно, по мере приближения к выходному сечению профили температуры газа в этих двух режимах изгибаются по-разному, средние температуры в выходном сечении также различны.

На рис. 4 представлены зависимости от расхода V_0 газа для температур t_g газа и воды t_l на входе в аппарат, на выходе из него и для средних значений по выходному для данной фазы сечению аппарата. Среднее значение температуры воды t_{lav} соответствует только капельному потоку жидкости в полости аппарата и не учитывает температуру воды, стекающей в виде пленки по стенке аппарата в общий водосборник охлажденной воды.

Среднее значение температуры воды t_{lex} по ее полному расходу через нижнее сечение аппарата (включая стекающую по стенке пленку) определялось как разность ее начальной температуры $t_{lin} = 49.3$ °C и убыли Δt_l, вычисляемой путем деления суммы $Q_l = Q_g + Q_v$ − из

отданного газу тепла Q_g и тепла Q_v, затраченного на испарение капель, − на теплоемкость воды и ее массовый расход через аппарат без учета массы (около 1%) испарившейся воды.

На рис. 4 можно заметить, что при одинаковом по модулю расходе газа температура охлажденной воды в прямоточном режиме немного ниже, чем в противоточном, так при расходе воздуха $|V_0| = 0.14$ м^3/с вода остывает, соответственно, на 12 и 11^{o}C.

Используя данные расчета, можно оценить эффективность охлаждения теплой воды воздухом в распылительных аппаратах. За меру эффективности примем известную для холодильных машин величину $\varepsilon = Q / A$ − отношения отбираемой у охлаждаемого тела теплоты Q к совершаемой внешней работе A. В данном случае величина $Q = c_l \rho_l V_l (t_{l1} - t_{l2}) = 313 \times \Delta t_l$ Вт − это разность между начальной и конечной теплотой охлаждаемой воды. Здесь учтено, что при давлении воды в форсунке $P_l = 0.5$ МПа ее объемный расход $V_l = 74.5 \times 10^{-6}$ м^3/с.

Внешняя работа тратится на создание двухфазного потока. В прямоточном режиме она равна энергии создаваемой форсункой струи жидкости $A = P_l V_l = 37.3$ Вт. В противоточном нужно добавить работу на создание вентилятором встречной к жидкости воздушной струи $\Delta A = |V_0| \Delta P = 0.14 \times 42.5 = 6.0$ Вт, т.е. энергозатраты выше на 16%, а ε ниже на 21%. Это приводит к выводу, что противоточный аппарат не имеет преимуществ перед прямоточным вопреки принятым представлениям, умозрительно обоснованным большей величиной относительной скорости фаз и, соответственно, коэффициентов тепломассообмена в противотоке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Simakov N.N.* Liquid Spray from Nozzles. Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2020. 204 p.

2. *Симаков Н.Н.* Расчет межфазного массообмена в факеле распыла форсунки с учетом кризиса // ЖТФ. 2020. Т. 90. № 4. С. 560.

3. *Симаков Н.Н.* Кризис сопротивления капель при переходных числах Рейнольдса в турбулентном двухфазном потоке факела распыла механической форсунки // ЖТФ. 2004. Т. 74. № 2. С. 46.

4. *Simakov N.N., Simakov A.N.* // Anomaly of gas drag force on liquid droplets in a turbulent two-phase flow produced by a mechanical jet sprayer at intermediate Reynolds numbers // J. Appl. Phys. 2005. Vol. **97**. P. 114901.

5. *Симаков Н.Н.* Численное моделирование двухфазного потока, созданного распыливанием жидкости форсункой // ЖТФ. 2017. Т. 87. № 7. С. 990.

6. *Симаков Н.Н.* Расчет межфазного тепломассообмена в факеле распыла форсунки с учетом кризиса сопротивления и тепломассообмена // Теоретические основы химической технологии. 2022. Т. 56. № 3. С. 345.

7. *Симаков Н.Н.* Сравнение результатов расчета массообмена в распылительных аппаратах для режимов прямо- и противотока фаз // ТОХТ. 2223. В печати.

УДК 621.391 DOI: 10.37816/eeste-2024-1-76-79

ВЛИЯНИЕ ПОТЕРЬ ПРИ ОБРАБОТКЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ
EFFECT OF ENERGY LOSS AT PROCESSING SIGNALS IN LANDING RADAR TO ACCURACY OF ANGLE COORDINATE

Андрей Викторович Суслин, Олег Джавдатович Гизатуллов
Suslin Andrey Victorovich, Gizatullov Oleg Dgavdatovich

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Россия, Воронеж
Military Educational and Scientific Center of the Air Force «N.E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy», Russia, Voronezh
(e-mail: 510323@list.ru)

Аннотация: Рассматривается измерение угловых координат воздушных судов в радиолокационных системах посадки при использовании фазоманипулированных радиосигналов. Анализируется ухудшение точности измерения угловых координат целей при наличие энергетических потерь. Показана возможность уменьшения энергетических потерь за счет использования в фазоманипулированных сигналах плавного изменения фазы между элементарными импульсами.

Abstract: Measurement of angular co-ordinates of aircrafts in landing radar-tracking systems at use phase manipulated radio signals is considered. Deterioration accuracy of measurement angular co-ordinates of the purposes at presence of power losses is analyzed. It has been shown that a decrease of energy loss is possible by using a phase-shift keyed radio signals with smoothly varying phase between the elementary pulses.

Ключевые слова: радиолокационная система, фазоманипулированный сигнал, энергетические потери, плавное изменение фазы, точность измерения угловых координат.

Keywords: radar system, phase- manipulated signal, energy loss, smooth phase change, accuracy processing of angle coordinate.

Одной из основных характеристик радиолокационных систем (РЛС) воздушных судов (ВС) является точность измерения их угловых координат [1-3].

Ошибки измерения угловых координат РЛС зависит от многих факторов: от параметров излучаемых радиосигналов, периодов их излучения, отношения сигнал/шум, полосы пропускания приемного тракта и т.д. Результирующую ошибку измерения угловой координаты принято оценивать соотношением [2]

$$\sigma_{\varphi} = \beta_{\varphi}\sigma_{\varphi\text{п}} = \beta_{\varphi}\frac{\varphi_{\text{А}}}{\sqrt{\pi Q}}, \qquad (1)$$

где β_{φ} – коэффициент потерь, характеризующий ухудшение потенциальной угловой точности $\sigma_{\varphi\text{п}}$, принимающий значения от 1 до 15, зависит от технической реализации системы, $\varphi_{\text{А}}$ – ширина диаграммы направленности антенны в плоскости сканирования, Q – отношение сигнал/шум.

В перспективных радиолокационных системах посадки предполагается использовать в качестве зондирующих фазоманипулированные радиосигналы (ФМРС) с модуляцией фаз элементарных импульсов по закону кода Баркера [2]

При обработке таких ФМРС из-за разрывности в моменты скачкообразного изменения фазы возникают энергетические потери, вызванные тем, что на временном интервале, соответствующим длительности элементарного импульса, может не укладываться целое число периодов несущего колебания [4].

Одним из способов уменьшения таких потерь является использование в ФМРС плавного изменения фазы (ПИФ) между элементарными импульсами [4]. Поэтому оценка влияния энергетических потерь, возникающих при использовании ПИФ между элементарными импульсами, на ошибки измерения угловой координаты РЛС представляет практический интерес.

Целью работы является исследование возможности снижения увеличения погрешности измерения угловой координаты РЛС с зондирующими ФМРС за счет использования в ФМРС ПИФ между элементарными импульсами.

Для выделения фактора влияния энергетических потерь при обработке сигналов представим коэффициент потерь в (1) в виде

$$\beta_{\varphi} = \beta_{\varphi 1}\beta_{\varphi э}, \tag{2}$$

где $\beta_{\varphi э}$ – коэффициент, определяющий энергетические потери, возникающие при обработке принимаемого сигнала, $\beta_{\varphi 1}$ – коэффициент определяющий потери за счет других факторов.

Для анализа влияния потерь запишем выражение для ошибки измерения дальности, соответствующей требованиям

$$\sigma_{\varphi 0} = \beta_{\varphi 1}\frac{\varphi_{\text{A}}}{\sqrt{\pi Q_0}}, \tag{3}$$

где Q_0 – отношение сигнал/шум, обеспечивающее требуемую ошибку.

Выражение для ошибки измерения угловой координаты, учитывающее энергетические потери, примет вид

$$\sigma_{\varphi} = \beta_{\varphi}\sigma_{\varphi п} = \beta_{\varphi 1}\beta_{\varphi э}\frac{\varphi_{\text{A}}}{\sqrt{\pi Q}}. \tag{4}$$

Разделив левые и правые части (4) и (3) получим

$$\left(\frac{\sigma_{\varphi}}{\sigma_{\varphi 0}}\right)^2 \frac{Q}{Q_0} = \beta^2{}_{\varphi э}. \tag{5}$$

На рисунке 1 показаны зависимости Q/Q_0 от $\sigma_{\varphi}/\sigma_{\varphi 0}$ при различных значениях $\beta^2{}_{\varphi э}$. Сплошным кривым соответствуют параметры 1 – $\beta^2{}_{R э}$=1; 2 – $\beta^2{}_{R э}$=2; 3 – $\beta^2{}_{R э}$=3.

При отсутствии потерь минимальная дисперсия оценки угловой координаты достигается при выходном отношении сигнал/шум Q_0. При наличии потерь для уменьшения ошибки измерения угловой координаты, отношение сигнал/шум должно быть увеличено в $\beta^2{}_{\varphi э}$ раз.

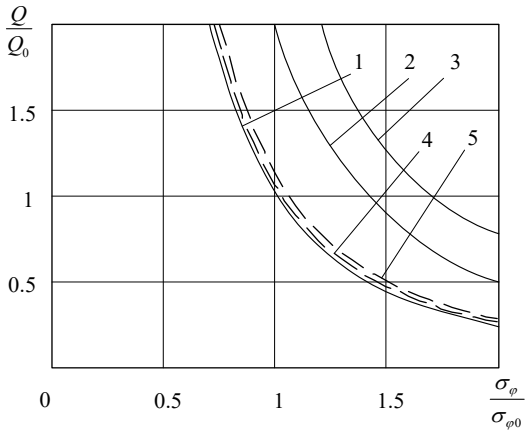


Рисунок 1 — Зависимости $\sigma_{\varphi}/\sigma_{\varphi 0}$ от Q/Q_0 при различных $\beta^2{}_{\varphi э}$

Точки пересечения горизонтальной линии $Q/Q_0=1$ с кривыми, построенными при различных значениях коэффициента $\beta^2_{\varphi э}$, спроецированные на ось $\sigma_\varphi/\sigma_{\varphi 0}$, показывают увеличение среднеквадратического отклонения (СКО) ошибки измерения угловой координаты за счет потерь.

Как отмечено выше коэффициент, учитывающий энергетические потери может достигать значений 2; 3 и, следовательно, СКО ошибок измерения угловой координаты могут увеличиться до 70 %.

Рассмотрим, как влияет на измерение точности оценивания угловой координаты ВС в РЛС применение ФМРС с плавным изменением фазы (ПИФ) между элементарными импульсами. Выражение для ФМРС с ПИФ можно представить в виде [5]

$$s(t)=\mathrm{Re}\left\{\dot{U}(t)\exp j\omega_0 t\right\}, \tag{6}$$

где

$$\dot{U}(t)=\sum_{k=1}^{n}\left\{p_{k-1}\lambda_k rect\left(\frac{t-(k-1)\tau_и}{\Delta\tau}\right)\mathrm{e}^{j\Omega(t-(k-1)\tau_и)}+p_k(1-\lambda_k)rect\left(\frac{t-(k-1)\tau_и}{\Delta\tau}\right)+\right.$$
$$\left.+p_k rect\left(\frac{t-(k-1)\tau_и-\Delta\tau}{\tau_и-\Delta\tau}\right)\right\}-$$

– комплексная огибающая ФМРС с ПИФ; n – размер кода или база сигнала (количество импульсов последовательности), $\{p_k\}_{k=1,..,n}$ – элементы кодовой последовательности, определяющие код модуляции фазы, p_k – k – ый элемент кода, принимающий значения +1 или –1, $rect\left(\frac{t-(k-1)\tau_и}{\tau_и}\right)=\begin{cases}1, & (k-1)\tau_и\le t\le k\tau_и,\\ 0, & t<(k-1)\tau_и,\ t>k\tau_и-\end{cases}$ прямоугольная огибающая элементарного импульса ФМРС, с длительностью $\tau_и$, $\omega_0=2\pi f_0$ (f_0 – несущая частота).

Плавное изменение фазы в (2) осуществляется за счет изменения несущей частоты f_0 на $F_\Omega=\Omega/2\pi$ на интервале $\Delta\tau=\xi\tau_и$ ($\xi<1$). Причем $F_\Omega=\frac{1}{2\Delta\tau}$, $\lambda_k=\begin{cases}1, & p_{k-1}\ne p_k\\ 0, & p_{k-1}=p_k\end{cases}$ – параметр определяющий наличие или отсутствие изменения фазы между $k-1$ – м и k – м импульсами. При $\lambda_k=0$, $k=1,...,n$, плавное изменение фазы отсутствует и выражение (6) совпадает с выражением для огибающей $U(t)$ ФМРС со скачкообразным изменении фазы.

Как показано в [5], при приеме ФМРС с ПИФ между элементарными импульсами приемником, настроенным на прием ФМРС с базой $n=13$ со скачкообразным изменением фазы, коэффициент потерь определяется как

$$\left[\left(1-\frac{\xi}{n}\sum_{\nu=1}^{n}\lambda_\nu\right)^2+\left(\frac{2\xi}{\pi n}\sum_{\nu=1}^{n}p_\nu p_{\nu-1}\lambda_\nu\right)^2\right]^{-\frac{1}{2}}. \tag{7}$$

Его величина зависит от базы сигнала и величины интервала, на котором осуществляется плавное изменение фазы. Для ФМРС с модуляцией фазы по закону кода Баркера, величин интервалов на которых меняются фазы $\Delta\tau=0,25\tau_и$ $\Delta\tau=0,125\tau_и$ величина коэффициента потерь равна соответственно 1,13 и 1,06.

Зависимости $\sigma_\varphi/\sigma_{\varphi 0}$ от Q/Q_0 для случая применения ФМРС с ПИФ показаны на рисунке 1 пунктирными кривыми 4 – $\beta^2_{Rэ}$=1,06 ($\Delta\tau=0,125\tau_и$); 5 – $\beta^2_{Rэ}$=1,13 ($\Delta\tau=0,25\tau_и$).

В отличие от случая использования ПИФ в ФМРС при котором СКО ошибок измерения угловой координаты не превышают 6 % ($\beta^2_{\varphi э}=1,13$).

Выводы

Таким образом, полученные результаты показывают, что использование в РЛС фазоманипулированных радиосигналов с плавным изменением фазы между элементарными импульсами позволяет осуществлять измерение угловой координаты ВС в РЛС с ошибкой, не превышающей 6% от заданной по техническим характеристикам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авиационные радиолокационные комплексы / П.И. Дудник, Г.С. Кондратенков, Б. Г. Татарский и др: ВВИА имени проф. Н. Е. Жуковского. М, 2006. 1112 с.

2. Перевезенцев Л. Т., Огарков В. Н. Радиолокационные системы аэропортов: учеб. для вузов гражданской авиации изд. 2-е. М.: Транспорт, 1991. 360 с.

3. Дудник П. И., Ильчук А.Р., Татарский Б. Г. Многофункциональные радиолокационные системы: учеб. пособие для вузов / под ред. Б. Г. Татарского. М.: Дрофа, 2007. 283 с.

4. Кук Ч., Бернфельд М. Радиолокационные сигналы: Теория и применение : пер. с англ. / под ред. В.С. Кельзона. М. : Сов. радио, 1971. 568 с.

5. Нахмансон Г. С., Суслин А. В. Корреляционные и спектральные характеристики радиолокационного фазоманипулированного сигнала с плавным изменением фазы // Успехи современной радиоэлектроники. 2012. №4. С. 7 – 13.

УДК 62-69 DOI: 10.37816/eeste-2024-1-79-84

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО НАКОПИТЕЛЯ КАПСУЛЬНОГО ТИПА ДЛЯ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ
NUMERICAL SIMULATION OF A CAPSULE-TYPE HEAT STORAGE FOR HEAT SUPPLY SYSTEMS

Николай Михайлович Шарпар, Леонид Иванович Жмакин, Илья Николаевич Власов, Александр Николаевич Сорокин
Nikolai M. Sharpar, Leonid I. Zhmakin, Ilya N. Vlasov, Alexander N. Sorokin

Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), Россия, Москва
The Kosygin State University of Russia, Russia, Moscow
(e-mail: li_zhmakin@mail.ru; sharpar753@mail.ru)

Аннотация: Данная статья оценивает эффективность теплового накопителя с использованием пластиковых капсул, заполненных водой. Численное моделирование позволяет анализировать влияние параметров, таких как диаметр капсул, скорость воздушного потока и время накопления, на тепловые характеристики системы. Полученные результаты и графики температурных полей предоставляют важные данные для оптимизации процессов теплоснабжения с использованием возобновляемых источников энергии.

Abstract: This article evaluates the efficiency of a heat storage device using plastic capsules filled with water. Numerical simulation makes it possible to analyze the influence of parameters such as capsule diameter, air flow velocity and accumulation time on the thermal characteristics of the system. The obtained results and graphs of temperature fields provide important data for optimizing heat supply processes using renewable energy sources.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, пластиковые емкости, теплоаккумулирующая способность, температурные поля, энергетическая эффективность, оптимизация, теплосохранение.

Keywords: renewable energy sources, plastic containers, heat storage capacity, temperature fields, energy efficiency, optimization, heat preservation.

В настоящее время активно происходит развитие энергетических технологий, ориентированных на использование возобновляемых источников энергии [1, 2]. Одним из ярких направлений в этой области является солнечное теплоснабжение, которое проявляет себя как перспективная и эффективная альтернатива в ряде регионов России, где отсутствует централизованная система теплоснабжения [3].

Новые технологические решения, основанные на солнечной энергии, уже демонстрируют свою конкурентоспособность по сравнению с традиционными энергетическими системами. Это относится как к аспектам экономической эффективности, так и к окружающей среде. Положительные экономические показатели, а также минимизация негативного воздействия на окружающую среду делают солнечное теплоснабжение привлекательным вариантом для многих регионов, где отсутствует централизованная система теплоснабжения.

Особое внимание уделяется регионам России, которые не оборудованы централизованными системами теплоснабжения. Для этих территорий солнечное теплоснабжение представляет собой не только эффективный источник энергии, но и важный компонент для повышения устойчивости и энергетической независимости. Это также способствует сокращению выбросов углекислого газа, что в свою очередь содействует решению экологических проблем и поддерживает стратегии устойчивого развития.

Одной из важных задач, стоящих перед технологией солнечного теплоснабжения, является разработка эффективных тепловых аккумуляторов, способных компенсировать непостоянство выработки тепловой энергии солнечными установками. Эта проблема обусловлена переменностью солнечного излучения как в сезонном, так и в суточном масштабах. Необходимость эффективного управления этой переменностью подчеркивает важность разработки тепловых накопителей, которые играют ключевую роль в обеспечении стабильности и устойчивости теплового режима потребителей солнечной энергии [4, 5].

Тепловые накопители являются неотъемлемой частью системы солнечного теплоснабжения с воздушным теплоносителем, особенно в системах низкопотенциального теплоснабжения. Для этого типа систем часто используют тепловые накопители с пористой матрицей [6]. Процесс заряда такого накопителя включает подачу горячего воздушного потока в нижнюю часть устройства, где он омывает аккумулирующие элементы, остывает и, тем самым, сохраняет тепловой заряд внутри них. При разрядке накопителя воздух перемещается через верхний выпускной клапан.

Одним из вызовов в разработке таких систем является минимизация гидравлического сопротивления пористой матрицы, чтобы обеспечить свободный конвективный теплообмен. Это позволяет избежать необходимости установки насосов для преодоления гидравлического сопротивления. Дополнительные усилия направлены на снижение амплитуды температурных колебаний теплоносителя, что достигается использованием нескольких накопителей одновременно.

В данной работе рассмотрено конструктивное исполнение теплового накопителя, в котором пористую матрицу формируют пластиковые емкости, наполненные водой и расположенные в корпусе аппарата с регулярной тетраэдрической укладкой. Этот подход представляет собой инновационное решение, обеспечивающее эффективное сохранение и передачу тепловой энергии в системе.

Использование пластиковых емкостей с водным наполнителем, организованных в тетраэдрическую структуру внутри корпуса, представляет собой уникальное конструктивное решение, которое может значительно улучшить теплообмен внутри накопителя. Такой подход обеспечивает оптимальное распределение тепла и повышает эффективность процесса теплосохранения.

В процессе анализа данного конструктивного варианта были получены дифференциальные уравнения в безразмерном виде, описывающие взаимодействие материала наполнителя и температуры воздуха внутри накопителя:

$$\frac{\delta T_b}{\delta X} = NTU * (T_M - T_b)$$
$$\frac{\delta T_M}{\delta \Theta} = NTU * (T_b - T_M) \quad (1)$$

Здесь Θ - безразмерное время; *NTU* – число единиц переноса; X = x / L - безразмерная координата в вертикальном направлении, где *L* – высота слоя наполнителя. Эти уравнения становятся ключевым инструментом для более глубокого понимания динамики системы, а также для проведения численных расчетов и оптимизации процессов в работе накопителя.

$$NTU = \frac{\alpha_v * FL}{(gc_p)_b}; \qquad \Theta = \frac{\tau (gc_p)_b}{FL (gc_p)_M * (1-\varepsilon)}$$

Для численного решения системы уравнений (1) была использована соответствующая вычислительная схема, изображенная на рисунке 1.

Для улучшения точности моделирования процессов внутри накопителя было предложено разбить наполнитель на N одинаковых слоев, каждый из которых обладает толщиной δ=L/N. Применяя первое уравнение системы (1), несложно установить, что температура воздушного потока изменяется экспоненциально при прохождении через каждый из этих слоев

$$\frac{(T_{b,i+1} - T_{M,i})}{(T_{b,i} - T_{M,i})} = \exp\left(-NTU \frac{\Delta x}{L}\right) = \exp\left(-\frac{NTU}{N}\right) \quad (2)$$

Данная дискретизация наполнителя позволяет более точно учесть изменения температуры воздушного потока внутри накопителя и, таким образом, повысить достоверность численных расчетов. Разделение наполнителя на слои обеспечивает более детальное представление о тепловых процессах, происходящих внутри системы, и дает возможность более точно определить температурные изменения в зависимости от геометрических и термических параметров каждого слоя.

Использование экспоненциальной зависимости для изменения температуры воздушного потока в каждом слое наполнителя дополняет данную методологию и учитывает специфику теплового переноса в данном типе накопителя. Это позволяет более точно описать распределение тепла и температурные градиенты внутри системы, что важно для точности численных результатов.

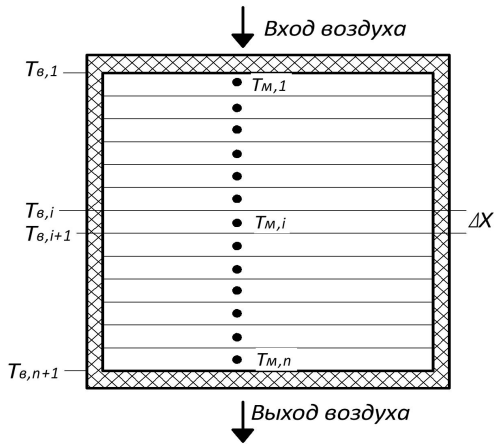


Рисунок 1 — Схема численного решения математической модели описывающей процесс зарядки теплового накопителя

В соответствии с этим, для каждого элементарного слоя «i» можно выразить энергетический баланс следующим образом:

$$(gc_p)_b (T_{b,i} - T_{b,i+1}) = (gc_p)_b (T_{b,i} - T_{M,i}) * [1 - \exp(-NTU|N)]$$

Второе уравнение из системы (1) может быть представлено в виде конечно-разностной формы

$$\frac{\tilde{T}_{M,i} - T_{M,i}}{\Delta\Theta} = NTU(T_{b,i} - \frac{\tilde{T}_{M,i} - T_{M,i}}{2}) \quad (3)$$

Из данного выражения можно определить температуру следующего слоя наполнителя в последующий момент времени, при условии, что значение температуры в текущий момент времени известно

$$\tilde{T}_{M,i} = \frac{T_{b,i} + T_{M,i}(1 - 0{,}5\beta)}{(1 + 0{,}5\beta)} \quad (4)$$

Согласно формуле (4) коэффициент β определяется, как NTU·ΔΘ, а ΔΘ является временным шагом.

Таким образом, процедура численного решения системы уравнений (1), описывающей изменение температуры наполнителя с течением времени при накоплении тепловой энергии (зарядке) аппарата и изменение температуры горячего воздушного потока по высоте пористой матрицы, может быть представлена следующим образом. Начнем с установки начального температурного распределения в наполнителе (в самом простом случае, оно может быть равномерным). На входе в тепловой накопитель принимается температура поступающего воздуха $Тв,_1$, поступающего из солнечных траспирационных коллекторов [7, 8]. Затем, с использованием уравнений (2) и (4), определяются $Тв,_1$ и и $\widetilde{T}_{м,1}$. Далее, вычислительная процедура повторяется для каждого последующего элементарного слоя наполнителя.

Этот подход позволяет описать динамику теплового процесса внутри теплового накопителя, учитывая изменения температуры воздушного потока и наполнителя на протяжении времени. Это важный этап в понимании и оптимизации работы системы, а также в установлении оптимальных условий зарядки и разрядки теплового накопителя.

В результате расчетов была предпринята попытка учесть температурные градиенты в элементах наполнителя при обновлении числа единиц переноса. Эта процедура осуществляется с использованием следующей формулы:

$$NTU_c = \frac{NTU}{1 + \frac{Bi}{5}}$$

В уравнении выше, *Bi* представляет собой число Био для элементов наполнителя и определяется выражением $Bi = \alpha R/\lambda$, где α представляет коэффициент теплоотдачи между элементами наполнителя и воздухом, λ - коэффициент теплопроводности материала, а *R* - радиус соответствующего элемента.

Полученные результаты численных вычислений, описывающих изменение температуры наполнителя и воздуха в процессе зарядки теплового накопителя, представлены на рисунке 2. В данном исследовании рассмотрены случаи, где скорость воздушного потока при подаче в накопитель составила 0,04 м/с, а высота слоя наполнителя была установлена на уровне 2 метров, при диаметре капсул - 0,06 м. В начальных условиях температура горячего воздушного потока на входе в систему равнялась 50°C, а начальная температура наполнителя была установлена на уровне 20°C.

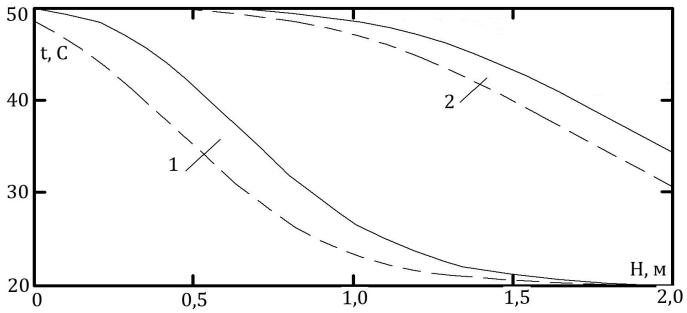


Рисунок 2 — Температурные поля в капсулах с аккумулирующим материалом в течении

На рисунке 2 представлены температурные поля внутри капсул с аккумулирующим материалом в течение различных временных интервалов: 2 часа (кривые 1) и 6 часов (кривые 2). Сплошные линии отображают изменение температуры теплоносителя, в то время, как штриховые линии представляют температуру капсул с аккумулирующим материалом.

Анализ графиков позволяет изучить динамику изменения температур внутри капсул с диаметром 0,06 м в разные моменты времени. Кривые 1 и 2 соответствуют разным промежуткам времени, предоставляя информацию о тепловых процессах в системе на различных этапах ее функционирования. Эти результаты важны при понимании тепловых характеристик теплового накопителя и могут служить основой для дальнейших исследований и оптимизации процессов теплоснабжения.

Выполненные расчеты позволяют сделать вывод, что уменьшение диаметра капсул с аккумулирующим материалом приводит к увеличению количества единиц переноса тепла. Это отчетливо просматривается на графиках рисунка 2, где кривая 1 соответствует NTU=53,7, а кривая 2 - NTU=13,6. При уменьшении диаметра наблюдается снижение разницы в температуре между наполнителем и нагретым теплоносителем.

Исходя из данных [9], следует отметить, что при значениях NTU выше 25 различие в температуре, определенное на основе инженерных вычислений, становится незначительным и, вероятно, может быть пренебрежено. Таким образом, влияние параметра NTU на разницу температур между наполнителем и теплоносителем может быть важным при более низких значениях NTU.

На основе проведенных вычислений по нагреву наполнителя теплового накопителя была определена его теплоаккумулирующая способность (TAC). Теплоаккумулирующая способность представляет собой количество тепла, которое накапливается в тепловом накопителе в разные моменты времени относительно максимально возможного значения

$$Q = (t_{гв} - t_o) * \rho * c_p * V * \tau \quad (5)$$

где to и V - представляют собой начальную температуру и объем наполнителя соответственно; τ - обозначает концентрацию твердой фазы в наполнителе; ρ*Cp - объемная теплоемкость материала внутри наполнителя; tгв - температура горячего воздуха при накоплении тепловой энергии.

В данной работе в качестве наполнителя использовались пластиковые емкости, заполненные водой, с эквивалентным диаметром 0,06 м. Заданные параметры в нашем случае следующие: температура горячего воздуха при зарядке tгв = 50 °C; начальная температура to = 20 °C; объем наполнителя V = 4 м^3; концентрация твердой фазы τ = 0,6; объемная теплоемкость материала в наполнителе ρ*Cp = 4190 кДж/(м^{3}К). С учетом указанных параметров, получаем, что количество теплоты Q, переданное в систему, составляет 6,034*10^5 кДж.

Расчет реально накопленной тепловой энергии проводился двумя способами с использованием численного интегрирования и по средней температуре слоев наполнителя. Первый метод включает в себя вычисление тепловой энергии путем численного интегрирования с использованием того же временного шага, что и при оценке подогрева, что обеспечивает более точные значения, учитывая динамику изменения температурных параметров в разные моменты времени. Второй метод включает определение тепловой энергии на основе средней температуры слоев наполнителя, что приводит к более упрощенной, но при этом значимой оценки тепловой энергии в системе. В этом случае для расчета используется средняя температура слоев наполнителя, что позволяет учесть общую тенденцию изменения температур внутри накопителя. Использование двух подходов к вычислению накопленной тепловой энергии позволяет более полно охарактеризовать динамику процессов теплосохранения и обеспечивает надежные результаты анализа системы.

На рисунке 3 представлен профиль TAC для системы со скоростью воздушного потока 0,04 м/с и диаметром капсулы 0,06 м. График визуализирует аккумулирующую способность, т.е. эффективность системы удерживать и накапливать тепловую энергию в наполнителе 2 часа (0,220) и 6 часов (0,782). Анализ данного профиля представленного на рисунке 3

позволяет оценить эффективность и длительность теплового накопления, что является ключевым аспектом в работе тепловых накопителей.

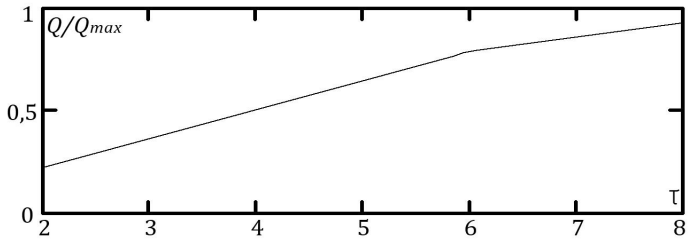


Рисунок 3 — Аккумулирующая способность пластиковых капсулы с диаметром 0,06 м

Выводы

Результаты численного моделирования позволили оценить эффективность теплового накопителя с использованием пластиковых капсул с водой. Полученные графики температурных полей и ТАС демонстрируют динамику изменения температур внутри накопителя и его способность сохранять тепловую энергию.

Исследование подтвердило, что параметры, такие как диаметр капсул, скорость воздушного потока и время накопления, существенно влияют на тепловые характеристики системы. Уменьшение диаметра капсул, например, приводит к увеличению количества единиц переноса тепла и уменьшению разницы температур.

В ходе исследования проведены расчеты заряда теплового накопителя, применяя канальную модель и модель наружного омывания элементов. Выполнена оценка аккумулирующей способности водонаполненных пластиковых емкостей, организованных в тепловом накопителе с тетраэдрической укладкой в корпусе. Полученные данные предоставляют важную информацию о тепловых характеристиках системы и обеспечивают основу для оптимизации процессов теплоснабжения с использованием данного типа тепловых накопителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сибикин Ю. Д. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: учебное пособие / Ю.Д. Сибикин, М. Ю. Сибикин. - 2-е изд., стер. - М.: КНОРУС, 2012. - 232 с.

2. Шарпар Н.М., Жмакин Л.И. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: Учебное пособие. – М.: ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина», 2017. – 128 с.

3. Повышение энергетической эффективности тепловой сети / Л.И. Жмакин, Н.М. Шарпар, Е.О. Полуцыган // Промышленные процессы и технологии. 2022. Т.2. № 3(5). С. 76–87. DOI: 10.37816/2713-0789-2022-2-3(5)-76-87.

4. Левенберг В.Д., Ткач М.Р., Гольстрем В.А., Аккумулирование теплоты, К., Техника, 1991. - 112 с.

5. Бут Д.А., Алиевский Б.Л., Мизгорин С.Р., Васюкевич П.В., Накопители энергии, М., Энергоатомиздат, 1991. - 398 с.

6. Шарпар Н.М., Жмакин Л.И. Лабораторный стенд и методика испытаний аккумулятора теплоты нагретого воздуха. В сборнике: Дизайн, технологии и инновации в текстильной и легкой промышленности (ИННОВАЦИИ-2020). Сборник материалов Международной научно-технической конференции. 2020. С. 27-30.

7. Zhmakin L.I., Sharpar N.M. Simulation of heat transport in a solar air collector with porous absorber // Fibre Chemistry. 2018. Т. 49. № 5. С. 338-341.

8. Шарпар Н.М., Жмакин Л.И., Османов З.Н. Солнечный воздухонагреватель транспирационного типа. Патент на полезную модель RU 194490 U1, 12.12.2019. Заявка № 2019100504 от 11.01.2019.

9. J.A. Duffie, W.A. Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes, 2 Edition, J.Wiley & Sons, USA, 1991, 919 p.

УДК 677.027.13 DOI: 10.37816/eeste-2024-1-85-87

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭКСТРАГИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ИЗ ХЛОПЧАТОБУМАЖНОЙ ТКАНИ
MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESS OF EXTRACTION OF TECHNOLOGICAL CONTAMINATIONS FROM COTTON FABRIC

Марина Зиевна Цинцадзе*, Мария Константиновна Кошелева*, Ольга Роальдовна Дорняк, Валерий Тимофеевич Казуб***, Елена Николаевна Широкопояс***
Marina Z. Tsintsadze*, Mariya K. Kosheleva*, Olga R. Dornyak, Valerij T. Kazub***, Elena N. Shirokopoyas***

**Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), Россия, Москва*
**The Kosygin State University of Russia, Russia, Moscow*
***Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, Россия, Воронеж*
***Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russia, Voronezh*
****Пятигорский медико-фармацевтический институт – филиал Волгоградского государственного медицинского университета, Россия, Пятигорск*
****Pyatigorsk Medical and Pharmaceutical Institute, a Branch of the Volgograd State Medical University, Russia, Pyatigorsk*
(e-mail: oxtpaxt@yandex.ru, ordornyak@mail.ru, bukva46@mail.ru)

Аннотация: Предложена математическая модель процесса экстрагирования (промывки), которая позволяет получить аналитическую зависимость значения средней по сечению (толщине) ткани концентрации технологического загрязнения от времени при проведении процесса без интенсификации и с интенсификацией. В основе - диффузионная модель удаления загрязнения из волокнистого материала.

Abstract: A mathematical model of the extraction (scouring) process is proposed, which makes it possible to obtain an analytical dependence of the average concentration of technological pollution over the cross-section (thickness) of the fabric on time when carrying out the process without intensification and with intensification. It is based on a diffusion model for removing contamination from fibrous material.

Ключевые слова: экстрагирование, моделирование, *хлопчатобумажная ткань.*
Keywords: extraction, modeling, cotton fabric.

Математическая модель процесса промывки предложена в виде краевой задачи, граничные и начальные условия которой соответствуют гидродинамической обстановке, реализуемой в высокоскоростных промывных машинах [1]. Обрабатываемая ткань интерпретируется как бесконечно тонкая пластина, а соответствующая одномерная краевая задача имеет вид (начало координат находится на одной из сторон ткани):

$$\begin{cases} \dfrac{\partial c}{\partial \tau} = D\dfrac{\partial^2 c}{\partial x^2} & (1) \\ c(x,0) = c_0 & (2) \\ D\dfrac{\partial c}{\partial x}\Big|_{x=0} = \beta\left(c|_{x=0} - c_p\right) - f(\rho_{\text{тк}}, \chi, l, U, J) & (3) \\ -D\dfrac{\partial c}{\partial x}\Big|_{x=\delta} = \beta\left(c|_{x=\delta} - c_p\right) - f(\rho_{\text{тз}}, \chi, l, U, J), & (4) \end{cases}$$

где C – концентрация удаляемого из ткани технологического «загрязнения» (кг/м^3); D – коэффициент диффузии (м^2/с); β – коэффициент массоотдачи (м/с); $\rho_{тк}$ – плотность ткани (кг/м^2); $\rho_{тз}$ – плотность технологического загрязнения (кг/м^3); J – интенсивность импульсного воздействия электрическим полем (Вт/м^3); U – скорость распространения импульсного воздействия в обрабатываемой среде (м/с); l - расстояние от источника импульсных воздействий до обрабатываемого объекта (м); τ – время(с); x – текущая координата (м); χ - коэффициент, учитывающий долю энергии интенсифицирующего воздействия, затрачиваемой на кавитацию.

Индексы: тк – ткань; тз - технологическое загрязнение; о – начало процесса; р – равновесие.

Введение новой функции:

$$\tilde{c}(x,\tau) = c(x,\tau) - c_p - f(\rho_{тз}, \beta, \chi, l, \rho_{тк}, U, J) \quad (5)$$

позволяет привести к однородному виду граничные условия (3)-(4). В новой системе координат $\tilde{c} - \tau$ краевая задача (1)-(4) может быть решена методом Фурье на интервале $\Delta\tau$, в пределах которого параметры $D, \beta, c_р$ фиксированы на их среднем уровне. Оценка степени соответствия указанных упрощений реальной обстановке в промывных машинах осуществляется сопоставлением решения задачи при сделанных допущениях экспериментальным данным.

На основе аналитического решения краевой задачи для процесса промывки может быть получена зависимость средней концентрации загрязнения в ткани от продолжительности промывки, что является обоснованием для аппроксимации экспериментальных кинетических кривых по промывке тканей зависимостью вида:

$$\mathrm{E}(\tau) = \frac{\overline{c}(x,\tau) - c_p}{c_0 - c_p} = A\, exp(-b\tau), \quad (6)$$

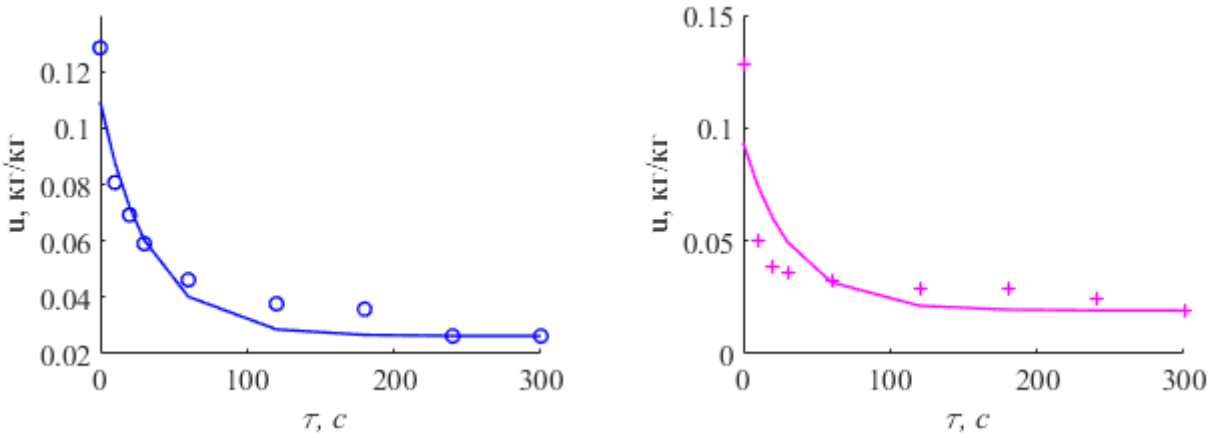
где E — приведённая концентрация загрязнения в ткани, A и b — константы, подлежащие определению.

Наличие оценок параметров A и b зависимости (6) позволяет использовать её в инженерной практике при проектировании и расчёте промывных машин. Практическая реализация такого подхода к расчёту процесса промывки основана на обработке экспериментальных кривых промывки методом наименьших квадратов.

Таким образом, в работе сформулирована краевая задача для процесса промывки плоских текстильных материалов, учитывающая влияние импульсного воздействия на обрабатываемую ткань [1]. Модель позволяет получить аналитические зависимости значения средней по сечению (толщине) ткани концентрации технологического загрязнения от времени.

В математической модели, которая использована на первом этапе исследования, вклад интенсификации электрическими разрядами — ЭР отражён в граничных условиях. Т.е. интенсификация массопереноса за счёт ЭР учтена приближённо только на поверхности плоского текстильного материала - хлопчатобумажной ткани. Результаты экспериментальных исследований [2,3] показывают, что предложенная модель позволяет приближенно аппроксимировать экспериментальные данные для зависимостей средней концентрации гидроксида натрия от времени промывки ткани (рис. 1а и 1б).

Модель может использоваться для приближённой аппроксимации кинетики процесса экстрагирования технологических загрязнений при интенсификации импульсным воздействием и может практически применяться в технологических задачах. Однако модернизация этой модели, учитывающая повышение интенсификации процесса массопроводности во всем объеме материала, позволит повысить точность аппроксимации.



а) б)

Рисунок 1 — Кинетические кривые промывки лёгкой хлопчатобумажной ткани после мерсеризации без воздействия (а) и с воздействием электрических разрядов (б). ○, + – экспериментальные данные; непрерывные кривые – расчёт по модели

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Математическое описание интенсифицированных процессов экстрагирования технологических загрязнений из плоских волокнистых материалов/ М.К. Кошелева, А.П. Булеков, В.Т. Казуб, М.З. Цинцадзе // Промышленные процессы и технологии. 2021. No1. С. 28–36DOI: 10.37816/2713-0789-2021-1-1-28-36

2. Кошелева М.К., Рудобашта С.П., Казуб В.Т., Цинцадзе М.З. Влияние электрических разрядов на кинетические коэффициенты в процессе промывки хлопчатобумажной ткани // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2020, №1 (385). С. 166-171.

3. Казуб В.Т., Кошелева М.К., Цинцадзе М.З. Особенности интенсифицирующего воздействия физических полей на процесс экстрагирования // Современные энергосберегающие тепловые и массообменные технологии (сушка, тепловые и массообменные процессы): сборник научных трудов Восьмой Международной научно-практической конференции (17−19 октября 2023 года). – М. : ООО «Мегаполис», 2023. С. 150-152.

УДК 621.391 DOI: 10.37816/eeste-2024-1-88-93

МОДЕЛЬ СИГНАЛОВ С НЕЛИНЕЙНОЙ ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ
MODEL SIGNALS WITH NONLINEAR FREQUENCY MODULATION

Андрей Викторович Суслин, Олег Джавдатович Гизатуллов
Andrey Victorovich Suslin, Oleg Dgavdatovich Gizatullov

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Россия, Воронеж
Military Educational and Scientific Center of the Air Force «N.E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy», Russia, Voronezh
(e-mail: 510323@list.ru)

Аннотация: Рассматриваются характеристики радиолокационных сигналов с нелинейной частотной модуляцией. Получены аналитические выражения для спектральной плотности и функции неопределенности сигналов с нелинейной частотной модуляцией. Показано что применение сигналов с нелинейной частотной модуляции позволяет снизить уровень боковых лепестков.

Abstract: Characteristics of radar signals with nonlinear frequency modulation is considered. Analytical expressions for the spectral density and function of uncertainty of signals with nonlinear frequency modulation are received. It has been shown that application of signals with nonlinear frequency modulation allows to reduce the level of side petals.

Ключевые слова: радиолокационная станция, сигналов с нелинейной частотной модуляцией, функция неопределенности, спектральная плотность.

Keywords: radar station, signals with nonlinear frequency modulation, uncertainty function, spectral density.

В настоящее время в радиолокационных системах (РЛС) ближней локации широко применяются сложные сигналы, позволяющие обеспечить необходимую дальность действия при заданном значении разрешающей способности РЛС по дальности [1,2]. К таким сигналам относятся сигналы с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ), особенностью которых является достаточно высокий уровень боковых лепестков спектральной плотности. Одним из способов их ослабления является использование в сигналах нелинейной частотной модуляции (НЛЧМ). Поэтому исследование частотных характеристик и функции неопределенности сигналов с НЛЧМ представляют практический интерес.

Целью работы является исследование спектральных плотностей и функции неопределенности частотно-модулированных сигналов с законами изменения частоты отличными от ЛЧМ.

Модели сигнала с нелинейной частотной модуляцией

Будем считать, что частота сигнала изменяется по закону (рисунок 1)

$$f(t) = f_0 + \frac{\Delta f_m}{1 + e^{-b\left(t - \frac{T}{2}\right)}}, \qquad 0 < t < T. \tag{1}$$

Здесь T – длительность сигнала с НЛЧМ, Δf_m – предельная девиация частоты (ширина спектра) НЛЧМ сигнала, f_0 – несущая частота, b – постоянная, характеризующая скорость изменения частоты.

$\Delta F = f(t) - f(0)$ – реальная девиация частоты.

Учитывая (1) нетрудно показать, что

$$\Delta f_m = \Delta F \frac{1 + chA}{shA},$$

где $A=\frac{bT}{2}$, а максимальная скорость изменения частоты НЛЧМ сигнала достигается в момент $t=\frac{T}{2}$ и равна $\frac{\Delta f_m b}{4}=\frac{b\Delta F}{4shA}\left(1+chA\right)$.

Вводя временной интервал T_0, на котором при линейной частотной модуляции со скоростью изменения частоты $\frac{\Delta f_m b}{4}$ девиация частоты достигает величины Δf_m, нетрудно увидеть, что $b=\frac{4}{T_0}$. В этом случае выражение для НЛЧМ сигнала с прямоугольной огибающей

$$s(t)=a\ rect\left(\frac{t}{T}\right)\cos 2\pi\left[f_0 t+\frac{B}{4}\left(\frac{1+chA}{shA}\right)\ln\frac{1+e^{b\left(t-\frac{T}{2}\right)}}{1+e^{-b\frac{T}{2}}}\right], \tag{2}$$

где a — амплитуда сигнала, $rect\left(\frac{t}{T}\right)$ — прямоугольная огибающая радиоимпульса длительностью T, $B=\Delta F T_0$ – база сигнала.

Рассмотрим спектральную плотность огибающей рассматриваемого сигнала. Выражение для спектральной плотности НЛЧМ сигнала в соответствии с выражением (2) можно записать следующем образом:

$$\dot{S}(\omega)=\int_{-\infty}^{\infty}\dot{s}(t)\cdot \mathrm{e}^{-j\omega t}dt=$$

$$a\int_0^T rect\left(\frac{t}{T}\right)\cos 2\pi\left[f_0 t+\frac{B}{4}\left(\frac{1+chA}{shA}\right)\ln\frac{1+e^{A\left(2\frac{t}{T}-1\right)}}{1+e^{-A}}\right]e^{-j\omega t}dt=$$

$$=\frac{a}{2}\int_0^T\left\{\exp\left[j2\pi\left(f_0+f\right)t+j2\pi\frac{B}{4}\left(\frac{1+chA}{shA}\right)\ln\frac{1+e^{A\left(2\frac{t}{T}-1\right)}}{1+e^{-A}}\right]+\right. \tag{3}$$

$$\left.+\exp\left[j2\pi\left(f_0+f\right)t-j2\pi\frac{B}{4}\left(\frac{1+chA}{shA}\right)\ln\frac{1+e^{A\left(2\frac{t}{T}-1\right)}}{1+e^{-A}}\right]\right\}dt=$$

$$=\dot{S}\left(\omega_0-\omega\right)+\dot{S}\left(\omega_0+\omega\right),$$

Вследствие симметрии спектральной плотности будем рассматривать только составляющую $\dot{S}\left(\omega_0-\omega\right)$.

Проводя необходимые преобразования и нормируя спектральную плотность на $\frac{aT}{2}$, получим

$$\left|\hat{S}\left(\Delta\hat{f}\right)\right|=\sqrt{\hat{S}_c^2\left(f_0-f\right)+\hat{S}_s^2\left(f_0-f\right)},$$

где

$$\left.\begin{matrix}\hat{S}_c^2\left(f_0-f\right)\\ \hat{S}_s^2\left(f_0-f\right)\end{matrix}\right\}=\begin{cases}\int\limits_0^1 \cos 2\pi\dfrac{B}{4}\left[\Delta\hat{f}Ax+\left(\dfrac{1+chA}{shA}\right)\ln\dfrac{1+e^{A(2x-1)}}{1+e^{-A}}\right]dx\\ \int\limits_0^1 \sin 2\pi\dfrac{B}{4}\left[\Delta\hat{f}Ax+\left(\dfrac{1+chA}{shA}\right)\ln\dfrac{1+e^{A(2x-1)}}{1+e^{-A}}\right]dx\end{cases},$$

$$x=\frac{t}{T},\qquad \Delta\hat{f}=2\frac{f_0-f}{\Delta F}$$

В дальнейшем полученные результаты будем сравнивать с известными результатами для ЛЧМ сигналов.

Выражение для ЛЧМ сигнала с прямоугольной огибающей записывается следующим образом [1,3,4]:

$$s(t)=a\ rect\left(\frac{t}{T}\right)\cos 2\pi\left(f_0t+\frac{\alpha t^2}{2}\right), \tag{4}$$

параметры в (4) аналогичны (2), $\alpha=\dfrac{\Delta F}{T}$ – скорость изменения частоты ЛЧМ сигнала, ΔF – девиация ЛЧМ сигнала выбирается равной девиации частоты НЛЧМ сигнала.

На рисунке 1 представлены результаты расчетов нормированного модуля спектральной плотности НЛЧМ сигнала (сплошные кривые), как функции от частотной расстройки $\Delta\hat{f}=2\dfrac{f_0-f}{\Delta F}$, при различных значениях параметров $A=2\dfrac{T}{T_0}$ и B. Для сравнения на этих же рисунках представлены спектральные плотности ЛЧМ сигналов (пунктирные кривые). Рисунок 1 а для параметров $A=2$, $B=10$; рисунок 1 б – $A=2$, $B=20$; рисунок 1 в – $A=3$, $B=10$; рисунок 1 г – $A=3$, $B=20$.

Как следует из рисунка 1, спектральная плотность НЛЧМ сигнала обладает более узким центральным пиком по сравнению с ЛЧМ сигналом, что объясняется законом изменения частоты. Наблюдается отсутствие боковых лепестков высокого уровня спектральной плотности НЛЧМ сигнала, в отличие от спектральной плотности ЛЧМ сигнала, уровень которых уменьшается с увеличением базы сигнала. Увеличение A с 2 до 3 (соответствует уменьшению линейной части НЛЧМ сигнала) приводит к появлению боковых лепестков спектральной плотности НЛЧМ сигнала, уровень которых меньше уровня боковых лепестков спектральной плотности ЛЧМ сигнала.

Функция неопределенности сигнала с нелинейной частотной модуляцией

Выражение для функции неопределенности (ФН) [2,3] (когда время задержки между принимаемым и опорным сигналами τ) определяется как:

$$\dot{\rho}(\tau,F)=\frac{\int\limits_{-\infty}^{\infty}\dot{U}(t)\overset{*}{U}(t-\tau)\mathrm{e}^{j2\pi Ft}dt}{\int\limits_{-\infty}^{\infty}\left|\dot{U}(t)\right|^2dt};$$

В соответствии с (1), получим

$$\dot{\rho}(\gamma,\hat{F})=\int\limits_{\gamma}^{1}\exp\left\{j2\pi\frac{B}{4}\left[\hat{F}Ax+\frac{1+chA}{shA}\ln\frac{1+e^{A(2x-1)}}{1+e^{A(2x-2\gamma-1)}}\right]\right\}dx, \tag{5}$$

Модуль (5) принимает вид

$$\rho(\gamma,\hat{F})=\sqrt{G_c^2\left(\gamma,\hat{F}\right)+G_s^2\left(\gamma,\hat{F}\right)},$$

где

$$\left.\begin{matrix} G_c^2\left(\gamma,\hat{F}\right) \\ G_s^2\left(\gamma,\hat{F}\right) \end{matrix}\right\} = \begin{cases} \int\limits_{\gamma}^{1} \cos 2\pi \dfrac{B}{4}\left[\hat{F}Ax + \left(\dfrac{1+chA}{shA}\right)\ln\dfrac{1+e^{A(2x-1)}}{1+e^{A(2x-2\gamma-1)}}\right]dx \\ \int\limits_{\gamma}^{1} \sin 2\pi \dfrac{B}{4}\left[\hat{F}Ax + \left(\dfrac{1+chA}{shA}\right)\ln\dfrac{1+e^{A(2x-1)}}{1+e^{A(2x-2\gamma-1)}}\right]dx \end{cases}, \quad (6)$$

$$\gamma = \frac{\tau}{T},\ \hat{F} = \frac{F}{\Delta F/2}.$$

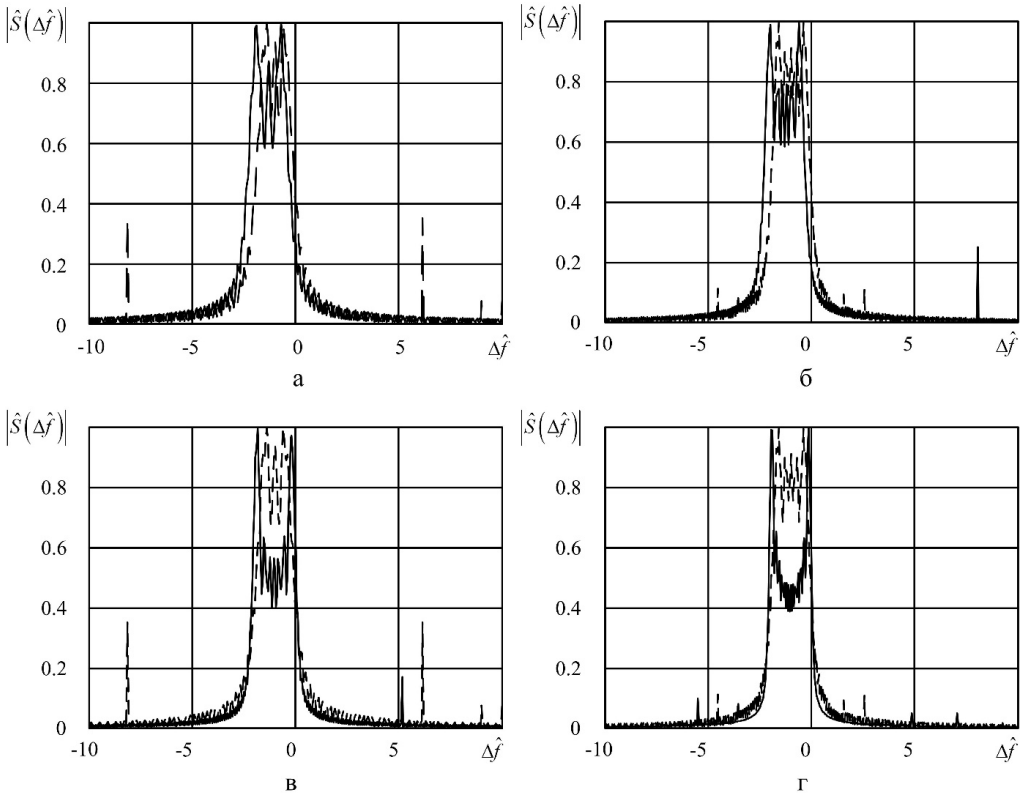


Рисунок 1 — Нормированный модуль спектральной плотности

Если в (6) $\gamma = 0$, то есть время задержки соответствует главному пику функции неопределенности вдоль оси времени задержки, тогда выражение (6) определяют главное сечение функции неопределенности вдоль оси частот, то есть нормированную функцию спектрального распределения мощности рассматриваемого сигнала по частоте.

На рисунке 2 показаны зависимости сечений ФН сигналов с НЛЧМ (сплошные кривые) и ЛЧМ (пунктирные кривые), вдоль оси времени задержки (а, в, д, ж) и вдоль оси частот (б, г, е, з). Рисунок 2 а, 2 б для параметров $A = 2$, $B = 10$; рисунок 2 в, 2 г – $A = 2$, $B = 20$; рисунок 2 д, 2 е – $A = 3$, $B = 10$; рисунок 2 ж, 2 з – $A = 3$, $B = 20$.

Из хода кривых на рисунках 2 а, в, д, ж видно, что наблюдается перераспределение уровня боковых лепестков с левой боковой полосы сечения ФН вдоль оси времени задержки для сигналов с НЛЧМ. Однако с правой боковой полосы сечение ФН НЛЧМ сигнала имеет более низкий уровень боковых лепестков, чем сечение ФН ЛЧМ сигнала. Боковые лепестки уменьшаются при увеличении базы НЛЧМ сигнала и уменьшении параметра A.

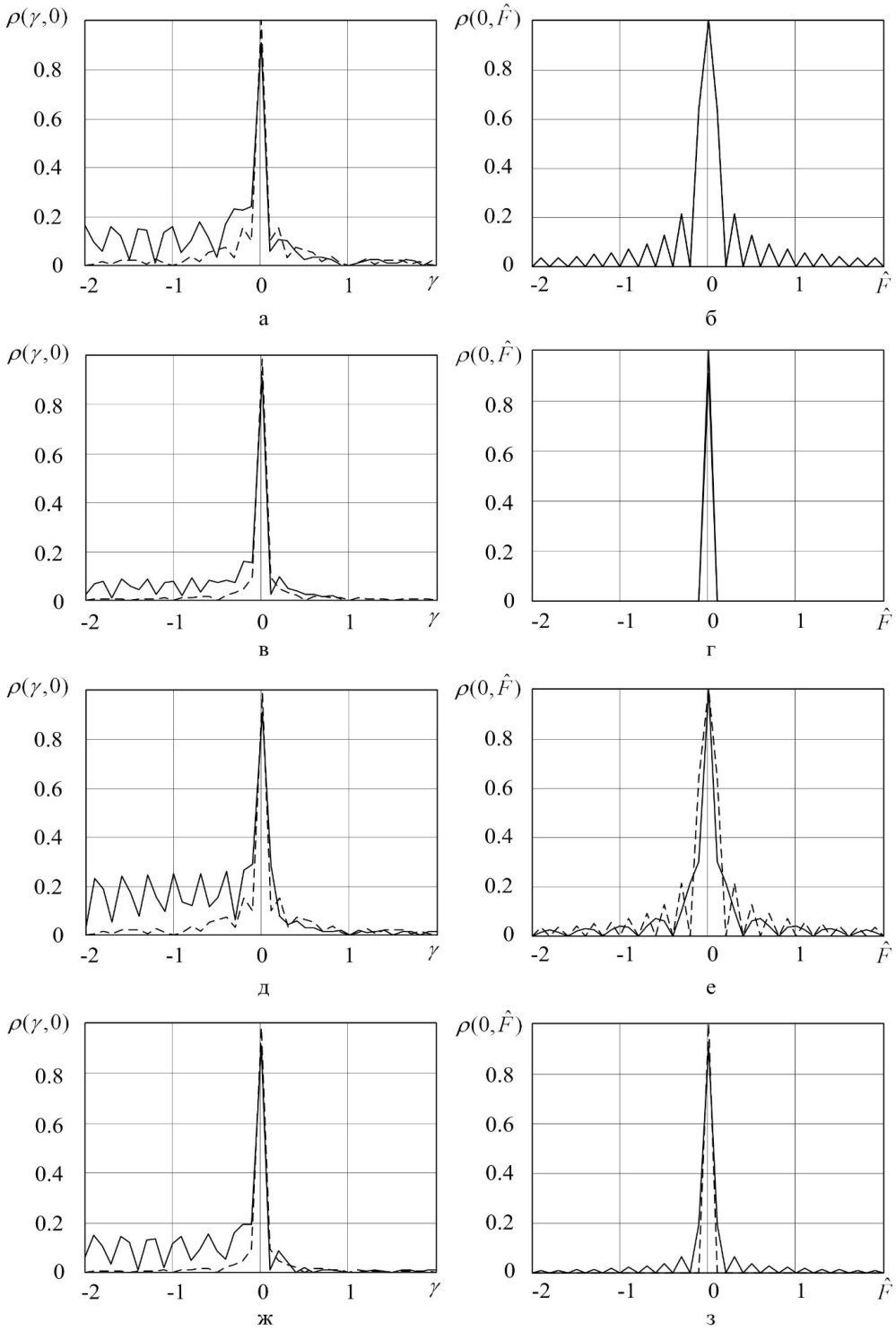


Рисунок 2 — Сечения функции неопределенности

Анализ сечения ФН вдоль оси частот (рисунок 2 б, г, е, з) показывает, что сечения ФН НЛЧМ и ЛЧМ сигналов совпадают при $A = 2$, с увеличением параметра A (уменьшении линейной части НЛЧМ сигнала) рисунок 2 е, з происходит незначительное расширение центрального пика, и увеличение боковых лепестков НЛЧМ сигнала. Уровень боковых лепестков сечения ФН уменьшается с увеличением баз рассматриваемых сигналов (рисунок 2 е, з).

Выводы

Полученные результаты показывают, что для НЛЧМ сигналов поведение функции неопределенности в её главном сечении вдоль оси времени задержки незначительно

отличается от поведения функции неопределенности ЛЧМ сигнала. В спектральной области использование НЛЧМ сигнала приводит к уменьшению ширины главного лепестка и максимальных уровней боковых лепестков спектральной плотности сигнала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авиационные радиолокационные комплексы / П. И.Дудник, Г. С. Кондратенков, Б. Г. Татарский и др: ВВИА имени проф. Н. Е. Жуковского. М, 2006. 1112 с.

2. Перевезенцев Л. Т., Огарков В. Н. Радиолокационные системы аэропортов: учеб. для вузов гражданской авиации изд. 2-е. М.: Транспорт, 1991. 360 с.

3. Дудник П. И., Ильчук А.Р., Татарский Б. Г. Многофункциональные радиолокационные системы: учеб. пособие для вузов / под ред. Б. Г. Татарского. М.: Дрофа, 2007. 283 с.

4. Кук Ч., Бернфельд М. Радиолокационные сигналы: Теория и применение : пер. с англ. / под ред. В.С. Кельзона. М. : Сов. радио, 1971. 568 с.

5. Нахмансон Г. С., Суслин А. В. Корреляционные и спектральные характеристики радиолокационного фазоманипулированного сигнала с плавным изменением фазы // Успехи современной радиоэлектроники. 2012. №4. С. 7 – 13.

УДК 621.039 DOI: 10.37816/eeste-2024-1-93-95

МОДИФИКАЦИЯ ПОДОГРЕВАТЕЛЯ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АЭС
MODIFICATION OF LOW PRESSURE HEATER BASED ON THERMAL-HYDRAULIC MODEL OF NPP

Дмитрий Александрович Голоднов, Владимир Андреевич Акатьев, Антон Игоревич Польгуев
Dmitriy A. Golodnov, Vladimir A. Akatev, Anton I. Polguev

Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), Россия, Москва
The Kosygin State University of Russia, Russia, Moscow
(e-mail: dmitry6830@gmail.com, akatev-va@rguk.ru, polguevai@yandex.ru)

Аннотация: Произведено моделирование теплогидравлических процессов на АЭС. Предложена модификация оборудования на основе разработанной модели. Решена проблема с непредусмотренным срабатыванием защиты.

Abstract: Thermal-hydraulic processes at nuclear power plants were modeled. A modification of the equipment based on the developed model is proposed. An issue with unintended security provision has been resolved.

Ключевые слова: теплогидравлика, моделирование, модификация, подогреватель низкого давления.

Keywords: thermal hydraulics, modeling, modification, low pressure heater.

В процессе эксплуатации 6-ого энергоблока НВАЭС выяснилось, что в подогревателе низкого давления смешивающего типа (ПНД-2) регулярно срабатывает защита по превышению уставочного уровня, что приводит к отключению конденсатных электронасосов (КЭН) 1-й ступени и последующей разгрузки по мощности.
Для того чтобы избежать данной ситуации было принято решение провести модификацию конструкции ПНД-2.

Подогреватель низкого давления является элементом системы регенерации низкого давления и предназначен для регенеративного подогрева основного конденсата паром из отборов ЦНД с минимальным недогревом основного конденсата до температуры насыщения

при давлении пара, равном давлению в камере отбора турбины к соответствующему подогревателю. Технические характеристики ПНД-2 приведены в табл. 1.

Для обоснования модификации был разработан программный комплекс, работающий следующим образом: эксплуатационные данные загружаются в модель энергоблока и образуют начальное состояние. Далее циклически вызываются расчетные модули: нейтронно-физический, теплогидравлический и АСУ ТП.

Таблица 1 – Технические характеристики ПНД-2

Наименование показателя	**Значение**
Конструкция	Вертикальный, смешивающий
Расход конденсата, рабочий/расчетный, т/ч	3474,3/4300
Расход пара, т/ч	152,4
Температура основного конденсата на входе, °С	62,7
Температура основного конденсата на выходе, рабочая/расчетная, °С	87/110
Давление пара, рабочее/расчетное, МПа (абс)	0,064/0,2
Температура пара, рабочая/расчетная, °С	87/120
Гидрозатвор ПНД-2: - тип - высота, м - материал	 Труба в трубе 10 Ст.20, Ст.20К
Материалы ПНД-2: - корпусные элементы - перегородки, внутренние устройства	 Ст.20, Ст.20К Ст3сп5
Масса, сухая, кг	40000

В программном комплексе были смоделированы основные контуры течения теплоносителя. 1 контур, 2 контур, а также ряд промежуточных контуров.

До модификации ПНД-2 при уменьшении степени открытия органы регулирования уровня (ОРУ) деаэратора расход из ПНД-2 в деаэратор уменьшается, а расход из конденсатора в ПНД-2 остается прежним из-за того, что ОРУ ПНД-2 еще не успели сработать. В результате уровень (рис. 1) начинает резко расти и достигал уставочного значения, что приводило к срабатыванию защиты, после которой отключается КЭН и мощность падает до 50% (рис. 2).

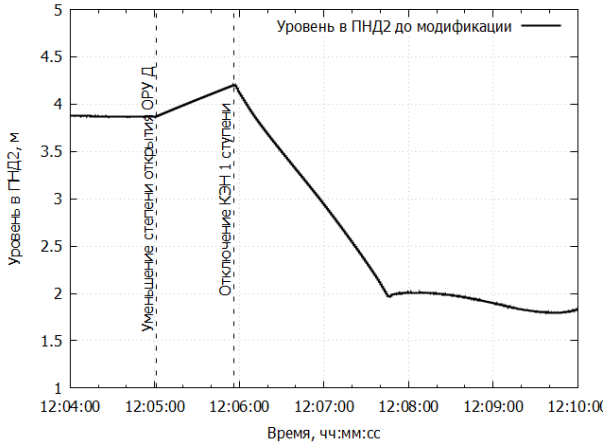


Рисунок 1 — Уровень в ПНД-2

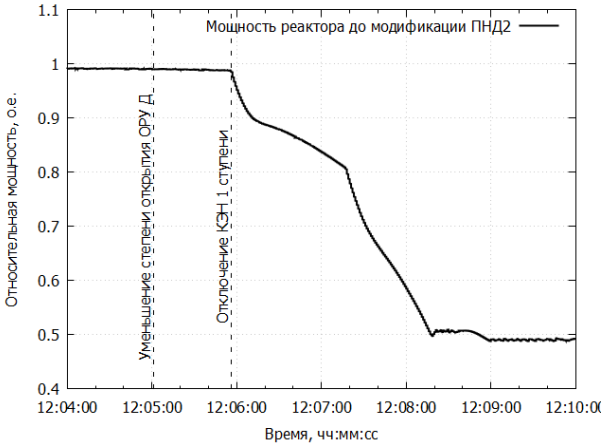


Рисунок 2 — Мощность реактора

С помощью программного комплекса было установлено, что при увеличении внутреннего диаметра с 3.5 м до 4 м инерционность уровня значительно снизится и уровень в ПНД-2 (рис. 3) не успеет дойти до отметки защиты. В результате защита не сработает и разгрузки по мощности не будет (рис. 4). Давление в ПНД-2 также останется стационарным.

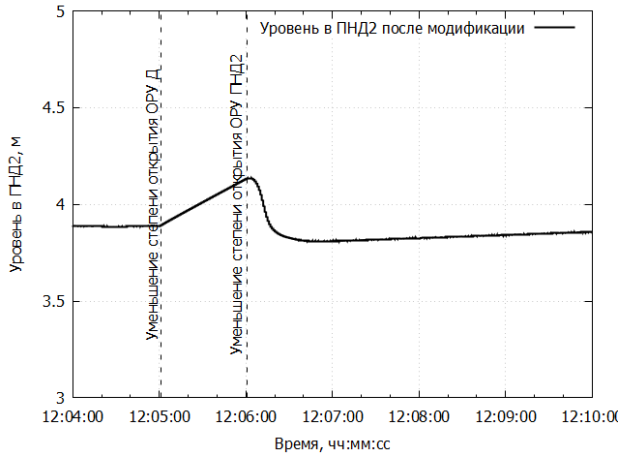


Рисунок 3 — Уровень в ПНД-2

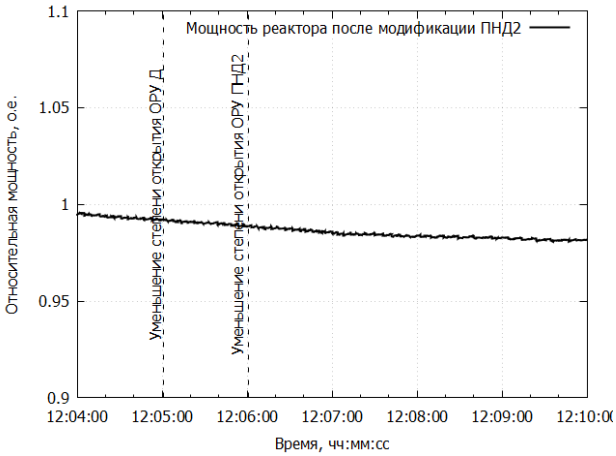


Рисунок 4 — Мощность реактора

В результате модификации диаметр увеличился с 3.5м до 4м. Объем увеличился с 105 м^3 до 138 м^3. Рабочее давление и температура в ПНД-2 изменяются менее чем на 0.1% и составляют 64 кПа и 87 ºС соответственно.

В результате проведенной модификации ПНД-2 были получены следующие положительные эффекты:

уменьшена инерционность уровня (рис. 3);

устранено срабатывание защиты по уровню в ПНД-2 из-за инерционности регуляторов уровня;

уменьшена инерция давления в ПНД-2;

удалось избежать разгрузки по мощности (рис. 4).

Выводы

Проведено моделирование теплогидравлических процессов 6 энергоблока Нововоронежской атомной электростанции. С помощью модели проверена гипотеза о модификации геометрической конфигурации ПНД-2.

Модифицированная версия ПНД-2 имеет более низкую инерционность уровня, что позволяет избежать срабатывания защиты КЭН 1-й ступени в условиях нормальной эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андрушечко С. А., Васльев Б. Ю., Косоуров К. Б и др. ВВЭР-1200 Эволюция классики. Физические основы эксплуатации, системы и элемнты, ядерное топливо, безопасность. М,: Логос, 2019.

2. Шмелев В. Д., Драгунов Ю. Г., Денисов В. П., Васильченко И. Н. Активные зоны ВВЭР для атомных электростанций – М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 220 с.: ил.

3. Лыков А. В. Тепломассообмен. М.: Энергия, 1971. 324 с.

4. Программный комплекс «ТИГР-1». Расчет нестационарных режимов в ЯЭУ с реакторами типа ВВЭР. Отчет о верификации / Курчатовский институт, Москва, 2000.

5. Александров А. А., Григорьев Б. А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. – М., Издательство МЭИ, 1999.

6. Современное состояние теплоснабжения и его развитие / Г. В. Рыбкина, А. А. Яблокова // Промышленные процессы и технологии. 2022. Т. 2. No 2(4). С. 89 – 99. DOI: 10.37816/2713-0789-2022-2-2(4)-89-99

УДК 533.924 DOI: 10.37816/eeste-2024-1-96-100

ПРИКЛАДНАЯ ПЛАЗМОХИМИЯ В ПРОЦЕССАХ УПРАВЛЕНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ НЕОРГАНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ
APPLIED PLASMA CHEMISTRY IN PROCESSES OF CONTROLLING PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF SURFACE LAYERS OF INORGANIC MATERIALS

Ильдар Шаукатович Абдуллин*, Сергей Владиславович Миронов **,
Ildar Sh. Abdullin*, Sergei V. Mironov**

**ООО «Плазма-ВСТ», Россия, Казань*
** Plasma-VST LLC, Russia, Kazan*
(e-mail: plasma.vst@gmail.com)
***Казанский (Приволжский) Федеральный Университет, Россия, Казань*
***Kazan (Volga Region) Federal University, Russia, Kazan*
(e-mail: plasma.vst@gmail.com)

Аннотация: В статье приведены результаты экспериментальных исследований плазмохимического воздействия высокочастотного разряда пониженного давления на неорганические материалы.

Abstract: The paper presents the results of experimental studies of plasma-chemical effect of high-frequency discharge of reduced pressure on inorganic materials.

Ключевые слова: ВЧ-плазма, ВЧ-разряд, энергия ионов, сталь, титановый сплав.

Keywords: HF plasma, HF discharge, ion energy, steel, titanium alloy.

Значение свойств поверхности для формирования функциональных, технологических и эксплуатационных характеристик материалов общеизвестно. Поверхность твердого тела – особая и очень важная область со специфическими свойствами, отличающимися от его объемных свойств. Интенсивное исследование поверхностей твердых тел и явлений, которые на них происходят, связано с решением научных и практических задач таких отраслей техники, как микроэлектроника, химия, особенно каталитическая химия, материаловедение, ионная имплантация и модифицирование поверхности, сварка.

Большинство электрофизических методов обработки модифицируют слои, или создают покрытия от микронной до миллиметровой толщины.

Есть ряд методов модификации, которые позволяют изменять отдельные свойства нанослоев, но при этом другие свойства остаются без изменения. Например, магнитно-импульсная обработка, позволяет упрочнять слои толщиной 2-10 нм, однако при этом не изменяется шероховатость поверхность и сохраняется трещиноватый и рельефный слои. Аналогичное действие оказывают и другие методы: вакуумно-лазерное напыление, магнетронное напыление, ионная бомбардировка (ионная очистка), очистка в тлеющем разряде, плазмохимическая очистка, реактивное испарение [1].

Общим признаком перечисленных методов является воздействие на поверхность концентрированными потоками энергии, в том числе потоком ионов. При этом есть промежуточный диапазон энергий ионов от 30 до 100 эВ, в котором можно ожидать сочетания преимуществ различных методов ионной обработки: глубина воздействия до 100 нм, уменьшение шероховатости, ликвидация трещиноватого и рельефного слоев.

Потоки ионов, обладающие энергией от 30 до 100 эВ возможно создать в плазме высокочастотного (ВЧ) разряда пониженного давления с продувом газа.

Результаты исследований показывают, что ВЧ плазма пониженного давления позволяет проводить обработку неорганических материалов различной физического природы и структуры: проводящие, полупроводниковые, диэлектрические; металлы и их сплавы; стекла; тонкие пленки, порошковые.

С ее помощью можно проводить глубокую очистку и активацию поверхности с удалением дефектных слоев, полировку, упрочнение, наносить и модифицировать тонкопленочные и многослойные покрытия [2].

Многообразие применений ВЧ плазмы пониженного давления обуславливается некоторыми особенностями, отличающими ее от разрядов, близких по диапазону давлений (тлеющий разряд) или способу ввода энергии (ВЧ индукционный разряд атмосферного давления).

Плазма, генерируемая высокочастотными разрядами, отличается повышенной чистотой плазмы из-за отсутствия электродов и практически неограниченным ресурсом работы. Исследования проводились на ВЧ плазменных установках, состоящих из стандартных блоков и элементов, включающих в себя генератор, ВЧ индуктор и ВЧ электроды, вакуумную систему, систему подачи плазмообразующего газа и диагностической аппаратуры [3].

При исследовании характеристик плазменного потока входные параметры установки варьировались в следующих пределах: давление от 1,33 Па до 399 Па, частота генератора от 1,76 до 27,8 МГц, расход плазмообразующего газа от 0 до 0,18 г/с. В качестве плазмообразующего газа в экспериментах использовался аргон высшего сорта, гелий, неон, криптон, и смеси воздуха, азота, углекислого газа, пропан-бутана с аргоном. Потребляемая мощность генераторов варьировалась в диапазоне от 1,5 до 20 кВт.

В этом диапазоне реализованы различные виды ВЧ разрядов пониженного давления: индукционные типа с соленоидальным индуктором, и емкостного типа с кольцевыми и плоскими электродами.

При проведении экспериментальных исследований плазмы с помощью специально созданного диагностического комплекса измерялись параметры плазмы. Степень ионизации 10^{-6}-10^{-4}, концентрация заряженных частиц 10^{15}-10^{18} $м^{-3}$, температура электронов 1-4 эВ, температура атомов и ионов в плазменной струе не превышает 0,1 эВ.

Выявлены следующие закономерности, существенно отличающие ВЧ разряды пониженного давления от других видов газового разряда:

1) наличие плазменной струи, в которой выделяется до 50 % от общей мощности в разряде;

2) в плазме ВЧ разряда пониженного давления у поверхности тела образуется слой не скомпенсированного положительного заряда (СПЗ). Толщина этого слоя составляет, в зависимости от степени термической неравновесности плазмы, от 0,1 до 2 мм. При этом потенциал тела относительно плазмы достигает значений величины 70-100 В;

3) Благодаря наличию у поверхности образца слоя положительного заряда толщиной до 2 мм, из плазмы на поверхность тела поступает слабоинтенсивный (0,3 – 25 $А/м^2$) поток низкоэнергетичных (30 – 100 эВ) ионов плазмообразующего газа, который и является основным фактором, воздействующим на поверхность материалов в плазме ВЧ разрядов пониженного давления.

С целью разработки метода модификации, позволяющего улучшить качество и надежность изделий машиностроения, проведены исследования взаимодействия ВЧ плазмы пониженного давления с металлами, диэлектриками, полупроводниками и тонкопленочными структурами. Каждую группу материалов формировали из представителей, наиболее широко применяемых в производстве. Поэтому из металлов выбраны: стали коррозионностойкие, жаростойкие, жаропрочные и износостойкие типа Х13, 12Х18Н9Т, 08Х18Т1; стали конструкционные, углеродистые качественные типа сталь 50, сталь 40, сталь 30; титановые сплавы ВТ-1, ВТ-3, ВТ-6, ВТ-8, ВТ-9; легированный чугун, медь типа МОО, латунь, алюминиевые сплавы Д16Т, АМЦ, силумины, цирконий и специальная проводящая керамика, твердый сплав ВК6-ОМ.

Из диэлектриков выбраны неорганические: поликор, ситалл, сапфир, стекла различных марок (КВ, К8, силикатные), кварц, пирекс, галлий-гадолиниевый гранат, искусственный алмаз, – и органические: полиэтилен, полистирол. Из полупроводниковых материалов

обработке подвергались кремний, германий, арсенид галлия, которые используются в электронной и микроэлектронной промышленности.

С целью улучшения эксплуатационных характеристик тонкопленочных структур исследовалось воздействие неравновесной низкотемпературной плазмы на проводящие (алюминиевые, медные, хромовые), диэлектрические (AI_2O_3, SiO_2, ZnS, MgF, TiN, TaC, YF_3) и многослойные тонкопленочные покрытия. В качестве материалов подложек использовались стекла марок КВ и К8, ситалл СТ-50-1, медь, сталь и алюминий.

С помощью ВЧ плазмы пониженного давления можно получить качественные тонкие пленки двуокиси кремния, сернистого цинка, халькогенидных стекол, ситалла, AI_2O_3, Si, Ge, B4C, TiN, TaC. Толщина получаемых пленок достигает 50 мкм. Максимальная неравномерность толщин полученных пленок составляет около 0,5%. Все виды полученных пленок по механической прочности относятся к нулевой группе. Нанесение пленок с помощью высокочастотной плазмы идет со скоростью 10–2 мкм/с и более. Результаты экспериментальных исследований показали, что при ВЧ плазменной обработке металлов и сплавов состав образцов существенно изменяется.

Исследования с помощью электронного магнитного спектрометра показали, что при взаимодействии ВЧ плазмы пониженного давления с металлами и сплавами происходит внедрение атомов плазмообразующих газов (Ar, N, O, C) в поверхностные слои. Так, в обработанных образцах стали 20Х13, на глубине 4-10 нм содержание аргона превышает фоновое в 1,5-2 раза, на глубине 10-30 нм наблюдается повышенная концентрация кислорода, хрома и образование при этом нитридов и карбидов хрома

Установлено, что при обработке материалов в струе ВЧ разряда пониженного давления в диапазоне параметров р=13,3 – 133 Па, G=0,04 – 0,08 г/с, Рр= 0,5 – 5 кВт, атомы инертного плазмообразующего газа проникают в поверхностный слой на глубину до 100 нм, образуя захороненные слои.

При добавлении в плазмообразующий газ реагирующих газов (N_2, O_2, CO_2, CH_4, C_3H_8+C_4H_{10}) на поверхности титановых сплавов, сталей образуются нитриды, оксиды и карбиды соответствующих металлов, параметры решетки изменяются довольно сильно в сторону увеличения как параметра а, так и с. Обнаружена тенденция повышения твердости поверхности после обработки в кислородосодержащей плазме. Глубина проникновения азота в сталь при плазменном азотировании в течение 30 мин. больше, чем при печном азотировании в течение 28 часов. После воздействия ВЧ плазмы на поверхности образцов появляется коррозионностойкая ε-фаза, толщина которой в 10 раз выше, чем при печном азотировании.

Азотированные слои, получаемые в ВЧ плазме пониженного давления, имеют более тонкую дифференцировку фаз, различия в чередовании фаз, различную морфологию нитридных фаз, большую разветвленность диффузионного фронта. Выявленные структурные особенности показывают, что ВЧ плазменную обработку при пониженном давлении можно использовать для целенаправленного изменения структуры и состава сплавов, прецизионного микро- и макро-упрочнения изделий. Аналогичные результаты получены при обработке образцов в плазме аргона с добавлением углекислого газа, пропан-бутана, кислорода.

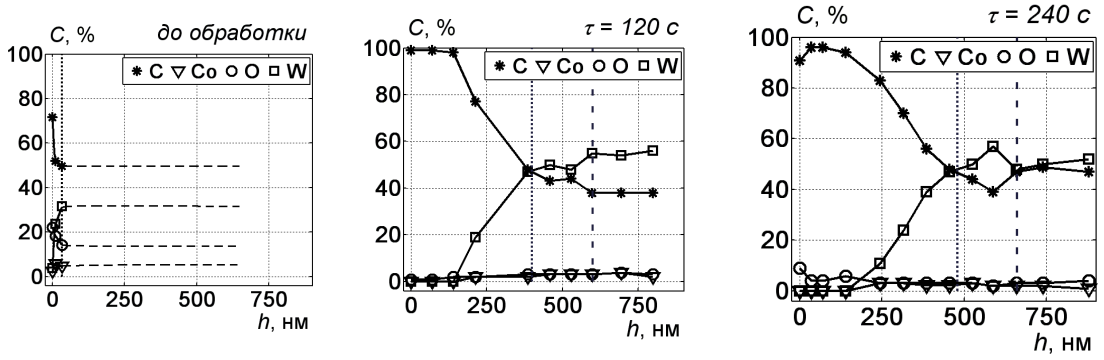
Установлено, что параметры решетки изменяются довольно сильно в сторону увеличения как параметра а, так и с. При измерении микротвердости поверхности титановых образцов, обнаружена тенденция ее повышения после обработки в азотсодержащей плазме

Сопоставление результатов испытаний различных видов сталей и титановых сплавов показало, что ВЧ плазменная обработка значительно ускоряет диффузионные процессы, как из газовой среды в поверхностные слои материала, так и внутри него. В результате этого существенно ускоряются процессы химико-термической обработки, в частности, азотирование сталей. Происходит аномально быстрое проникновение атомов азота вглубь стали. Процесс азотирования в ВЧ плазме пониженного давления протекает в 8 раз быстрее «классического» печного азотирования.

ВЧ плазменная обработка ускоряет также процессы самодиффузии в сталях. Следствием этого является ускорение процессов отпуска и рекристаллизации по сравнению с обычной термической обработкой.

Результаты коррозионных испытаний образцов из сталей и титановых сплавов показали, что в результате воздействия ВЧ плазмы пониженного давления происходит общее увеличение коррозионной стойкости, что объясняется образованием на поверхности модифицированного нанослоя.

В результате экспериментальных исследований поверхностных слоев вольфрамокобальтового сплава (рис.1), обработанного струйным ВЧ разрядом пониженного давления в смеси аргона и пропан-бутана обнаружен модифицированный поверхностный слой толщиной, в зависимости от продолжительности обработки, от 70 до 420 нм. В структуре поверхностного слоя можно выделить два подслоя: наружный толщиной ~10 нм, содержащий углерод в виде графита, и переходный толщиной от 10 нм до 70-420 нм, в котором присутствуют углерод в составе карбида вольфрама, углерод в алмазоподобном состоянии и углерод в связях C-H и C-O-H. Границы перехода между слоями показаны пунктирными линиями.



а) б) в)

Рисунок 1 — Распределение элементов по глубине образца в зависимости от времени обработки (плазмообразующий газ Ar (70%) + C_3H_8 (30%), P_p=1,3 кВт, p = 133 Па, G=0,06 г/с):
а) не обработанный; б) 120 секунд; в) 240 секунд.

Совокупность результатов по модификации поверхности сплава ВК6-ОМ, сталей, титановых сплавов, циркония, меди в потоке ВЧ плазмы пониженного давления свидетельствует о том, что на поверхности образуются нанодиффузные покрытия.

В результате диффузии дефектов структуры и атомов из нанослоев происходит газонасыщение глубинных слоев толщиной свыше 300 мкм, в поверхностном слое образуются, в зависимости от используемого плазмообразующего газа нитриды, оксиды или карбиды элементов, входящих в состав материала образца. При этом скорость диффузии атомов газа в процессе ВЧ плазменного газонасыщения в 2...5 раз превышает скорость диффузии при газонасыщении в разрядах постоянного тока.

Результаты металлографических исследований показали, что глубина модифицированного слоя составляет 20-30 мкм. Прочность образцов с плазменной обработкой близка к прочности образцов после поверхностно-пластического деформирования.

ВЧ плазменная обработка сплавов металлов приводит к повышению усталостной прочности на 25-35% с одновременным уменьшением шероховатости на 2 класса и сохранением неизменными остальных физико-механических свойств (например, пластичности). При этом в поверхностном слое формируются сжимающие остаточные напряжения на глубине до 200 мкм.

Исследования усталостных характеристик образцов и механических свойств показали, что в результате обработки в ВЧ плазме пониженного давления предел выносливости

увеличивается на 25-30%, микротвердость увеличивается более чем на 10%, в поверхностном слое создаются сжимающие остаточные напряжения, их эпюра становится более плавной, чем после ручной полировки.

Наибольшее изменение усталостных характеристик и механических свойств достигается в результате обработки в струе ВЧИ разряда пониженного давления при W_i=30-50 эВ и j_i=5-15 А/м^2 время плазменного воздействия 8-9 мин. Глубина модифицированного слоя составляет 20 – 30 мкм.

Выводы

Таким образом, в результате воздействия «холодной» ВЧ плазмы пониженного давления на металлы и твердые сплавы атомы плазмообразующего газа проникают в поверхностные слои материала на глубину до 30 нм. При добавлении в аргоновую ВЧ плазму реакционноспособных газов (N_2, O_2, C_3H_8) у поверхности образуется нанофазная система из оксидов, нитридов и карбидов элементов, входящих в состав материала.

В результате ВЧ плазменной обработки металлов и сплавов повышается коррозионная стойкость, микротвердость, износостойкость изделий из этих материалов. Эти изменения происходят в результате диффузии атомов плазмообразующих газов, дефектов структуры, созданных ВЧ плазмой в поверхностном нанослое.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Распыление твердых тел ионной бомбардировкой. Под ред. Р. Берлина. М.:Издательство «МИР», 1984. 336 с.

2. И.Ш. Абдуллин, М.М. Миронов, Г.И. Гаринова. Бактерицидные и биологически стойкие покрытия для модификации имплантов и инструментов медицинской техники. Электрофизиологическая и фотометрическая медицинская техника, 1999. С. 20-22.

3. Абдуллин И. Ш., Желтухин В. С., Кашапов Н. Ф. Высокочастотная плазменно-струйная обработка материалов при пониженных давлениях. Теория и практика применения. Казань: издательство Казан. университета, 2000. 348 с.

DOI: 10.37816/eeste-2024-1-101-108

АЛГОРИТМ ВЫБОРА ГОЛОВНОГО КЛАСТЕРНОГО УЗЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМА PSO В БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ
CLUSTER HEADS SELECTION ALGORITHM USING PSO IN WIRELESS SENSOR NETWORKS

Sun Kaiming

Intelligent Manufacturing Institute Heilongjiang Academy of Sciences, China, Harbin

Abstract: In general, Wireless Sensor Networks (WSNs) consist of numerous sensor nodes, and energy usage is an important issue in the design of WSNs which typically depend on portable energy sources like small capacity batteries for power. Although Low Energy Adaptive Cluster Hierarchical (LEACH) protocol is one of most outstanding algorithms for prolonging the whole network's lifetime, selecting suitable cluster heads still becomes a challenging issue for it. In this paper, cluster heads selection algorithm based on energy and coverage using Particle Swarm Optimization (PSO) is proposed. The performance of the proposed algorithm is compared with standard LEACH protocol. The simulation results show that proposed algorithm have better performances than LEACH in terms of first node die round and energy consume per round.

Аннотация: беспроводные сенсорные сети (WSN) состоят из множества сенсорных узлов, и энергоэффективность является важным вопросом при разработке WSN, которые обычно зависят от портативных источников энергии, таких как батареи небольшой ёмкости. Хотя протокол Low Energy Adaptive Cluster Hierarchical (LEACH) является одним из наиболее выдающихся алгоритмов продления срока службы всей сети, выбор подходящего головного кластера по-прежнему является сложной задачей. В данной статье предлагается алгоритм выбора головного кластера на основе энергии и покрытия с использованием оптимизации роя частиц (PSO). Производительность предложенного алгоритма сравнивается со стандартным протоколом LEACH. Результаты моделирования показывают, что предлагаемый алгоритм имеет лучшие характеристики, чем LEACH, с точки зрения первого раунда кристалла узла и потребления энергии за раунд.

Keywords: PSO, LEACH, Cluster Head, Coverage, WSNs.

Ключевые слова: PSO, LEACH, головной кластер, покрытие, беспроводные сенсорные сети (WSN)

1. Introduction

Wireless sensor networks (WSNs) are an emerging technology that has potential applications in surveillance, tactical combat situations, habitat monitoring, home security, urban management, environmental monitoring, and so on [1-4]. And it, involved distributed information processing technology, microelectronics sensor technology and etc, collect and transmit the detection object information within the defined area for centralized processing.

WSNs consist of numerous sensor nodes which are supported typically by portable energy sources like small capacity batteries for power, and computing performance and data storage and transmission are restricted by the limited energy of sensor nodes, so WSNs issues such as node deployment, localization, energy-aware clustering and data-aggregation are often formulated as optimization problems.

Cluster based hierarchical routing protocol such as Low Energy Adaptive Cluster Hierarchical (LEACH) protocol is an energy efficient routing protocol. LEACH is a clustering protocol that proposed by proposed by Heinzelman *et al.* [5], and aims to achieve load balancing among sensor nodes so the network lifetime can be prolonged. Typically, the whole network is divided into several clusters which include the cluster head and sensor nodes joined into this cluster. The cluster head acts as a hub collecting data send by the members of the same cluster and then packages the data to send

to sink, so energy consumption is concentrated on cluster heads. In LEACH protocol, each sensor nodes elects itself as a cluster head based on a probability model, so cluster heads may not guarantee efficient energy distribution. There is possibility that no cluster heads are elected or too many are elected in a single round. Furthermore, the cluster heads may concentrate in one region or locate at the edge of the networks.

The improvement of LEACH protocol known as LEACH-C is proposed in [5]. In LEACH-C protocol, the sensor nodes send their location and energy information to the sink and the sink calculates and selects the cluster head using the simulated annealing algorithm.

Particle swarm optimization (PSO) is a popular multidimensional optimization technique [6] that draws inspiration from the behavior of a flock of birds or the collective intelligence of a group of social insects with limited individual capabilities. In the paper, PSO is applied into sink to form better cluster heads distribution. In design of the fitness function of PSO, the parameters, energy and coverage, are considered especially.

The paper is organized as follows. In the next section, overview of cluster based hierarchical routing protocol LEACH and PSO are demonstrated. Section 3 describes the proposed algorithm followed by the analysis of the simulation results in section4. Lastly, section 5 concludes the findings.

2. Related Work

2.1. LEACH

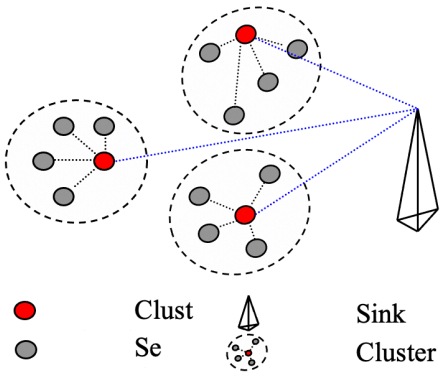


Figure 2.1 – The LEACH clustering structure for WSNs

LEACH clustering structure is shown as Fig.2.1. LEACH is a classical clustering mechanisms aiming to distribute the energy consumption all over the network and prolong the network lifetime by means of the randomly self-elected cluster heads. In LEACH, a threshold, $T(n)$, is defined as Eq. (2.10):

$$T(n)=\begin{cases}\dfrac{p}{1-p(r \bmod \frac{1}{p})} & if \quad n \in G \\ 0 & otherwise\end{cases} \tag{2.1}$$

where p is the proportion of the sensor nodes to be cluster head; r is the number of rounds that have been ended; G is a set of nodes which have never been cluster head in last $1/p$ rounds. This algorithm ensures that every sensor node becomes a cluster head exactly once within $1/p$ rounds.

LEACH operates in rounds divided into set-up phase and steady phase. In set-up phase per round, each sensor node independently generates the random number between 0 and 1. If the generated random number is less than the threshold value $T(n)$, the sensor node will elect itself to become the cluster head for current round and broadcast the information for other sensor nodes to join its cluster. In steady phase, the cluster head collects the data send by the sensor nodes belong to the same cluster and transmits the data to the sink.

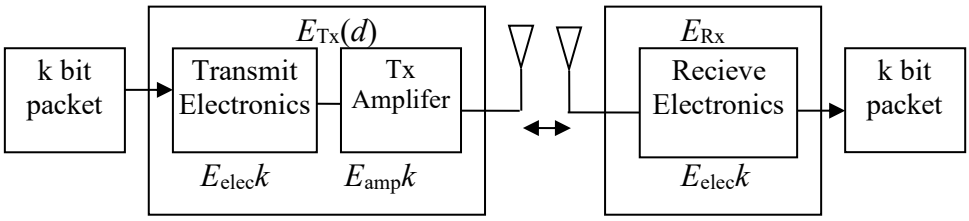


Figure 2.2 – First-order radio model

In LEACH, the model of the energy consumption is as follows:

$$E_{Tx}(k,d) = E_{Tx-elec}(k) + E_{Tx-amp}(k,d) \tag{2.2}$$

$$= \begin{cases} kE_{elec} + k\varepsilon_{fs}d^2 & ,d < d_0 \\ kE_{elec} + k\varepsilon_{amp}d^4 & d > d_0 \end{cases} \tag{2.3}$$

$$d_0 = \sqrt{\varepsilon_{fs} / \varepsilon_{amp}} \tag{2.4}$$

where E_{elec} is the circuit energy consumption for transmitting or receiving one bit data. ε_{fs} represents amplifier energy consumptions for a short distance transmission. ε_{amp} is amplifier energy consumptions for a distance transmission. d_0 is threshold distance. In according with the Eq. (2.3), the farer the cluster head is from sink, the more the energy consumption for transmitting.

And to receive this k-bit message, the radio expends:

$$E_{Rx}(k) = E_{elect}k \tag{2.5}$$

Although LEACH protocol has a good performance in prolonging the network lifetime, it has some disadvantages as follows:

1) LEACH depends only on the probability model to elect the CH, elected CH may be very close to each other.

2) In each round the number of the CH is dynamic and it cannot guarantee the data stream received at the sink.

3) There is possibly, no CH elected in current round.

4) CH will appear in the edge of the network or in the place where the node density is very low.

The disadvantages of LEACH protocol are mainly due to only using the local information. In LEACH-C protocol, centralized algorithm applied in the sink may select suitable cluster head based on global information such as position and energy.

2.2. Particle Swarm Optimization with Differentially perturbed Velocity

In classical PSO, numerous particles in an n-dimensional search pace are initialized with random positions $\vec{X}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \cdots, x_{in})$ and velocities $\vec{V}_i = (v_{i1}, v_{i2}, \cdots, v_{in})$, then the particle's positions and velocities are adjusted according to the evaluated value of the fitness function, $f_{fitness}$, and Eq. (2.6) at each step. The $f_{fitness}$ uses the particle's positional coordinates as input values. The position and velocity update equations of the n-th dimension of the i-th particles may be given as follow:

$$\begin{cases} \vec{V}_i(t+1) = \omega \cdot \vec{V}_i + c_1 r_1 (\vec{P}_b - \vec{X}_i(t)) + c_2 r_2 (\vec{P}_G - \vec{X}_i(t)) \\ \vec{X}_i(t+1) = \vec{X}_i(t) + \vec{V}_i(t+1) \end{cases} \tag{2.6}$$

where ω is the inertia weight; c_1 and c_2 are called acceleration constants; r_1 and r_2 are random positive numbers, drawn from a uniform distribution between [0,1]; $\vec{P}_b$ *i*s the best solution found so far by an individual particle, while $\vec{P}_G$ represents the fittest particle found so far in the entire swarm.

The classical PSO has been subjected to empirical and theoretical investigations [6-9] by several researchers. Inertia weight plays an important role to explore the searching field and converge on the searching result. In many occasions the convergence is premature, especially if the swarm uses

a small inertia weight ω or constriction coefficient. Also, the swarm suffers from loss of diversity in later generations if P_k and P_G are close enough.

A improved algorithm of the standard PSO is proposed in [8]. The position and velocity update equations are changed as follow:

$$\begin{cases} \vec{V}_i(t+1) = \begin{cases} \omega \cdot \vec{V}_i(t) + \beta\vec{\delta} + c_2\varphi(\vec{P}_G - \vec{X}_i(t)) & ,\vec{\lambda} < CR \\ \vec{V}_i(t) & ,otherwise \end{cases} \\ \vec{X}_i(t+1) = \begin{cases} \overrightarrow{Tr_i} & ,f_{fitness}(\overrightarrow{Tr_i}) < f_{fitness}(\vec{X}_i(t)) \\ \vec{X}_i(t) & ,otherwise \end{cases} \end{cases} \tag{2.7}$$

where CR is the crossover probability and β is a scale factor in [0, 1] and $\vec{\lambda}$ is a random n-dimensional vector in [0, 1];

$$\vec{\delta} = \vec{X}_k(t) - \vec{X}_j(t), (k \neq j \neq i),$$

as a difference vector between two other distinct particles selected randomly in the swarm and replacing the cognitive part of Eq. (2.7); and

$$\overrightarrow{Tr_i} = \vec{X}_i(t) + \vec{V}_i(t+1)$$

If a particle gets stagnant at any point in the search space, then the particle is shifted by a random mutation to a new location as follows:

If

$$\vec{X}_i(t) = \vec{X}_i(t+1) = \cdots = \vec{X}_i(t+N)$$

and

$$f_{fitness}(\vec{X}_i(t+N)) \neq f_{fitness}(\vec{P}_G)$$

then

$$\vec{X}_i(t+N+1) = \vec{X}_{\min} + \vec{\zeta} \cdot (\vec{X}_{\max} - \vec{X}_{\min})$$

where $\vec{\zeta}$ a random n-dimensional vector in [0, 1]; $\vec{X}_{\min}$ and $\vec{X}_{\max}$ define the permissible bounds of the search space; N is the maximum number of iterations up to which stagnation can be tolerated.

3. Algorithm Description

3.1. Coverage of WSNs

Consider a n by m sensor field grid and assume that there are N sensors deployed in the random deployment stage located at $S = (s_1, \cdots, s_N), s_i \in R^2$. Assume that each sensor has a detection range *r* determined by (3.1). In reality, sensor detections are imprecise; hence the coverage $C(x, s_i)$ needs to be expressed in probabilistic terms. In this work, we assume the following, proposed by [9]

$$C(\tilde{x}, s_i) = \begin{cases} 0 & if \quad d(s_i, \tilde{x}) \geq r + r_e \\ e^{-\lambda\alpha^\beta} & if \quad r - r_e \leq d(s_i, \tilde{x}) \leq r + r_e \\ 1 & if \quad d(s_i, \tilde{x}) \prec r - r_e \end{cases} \tag{3.1}$$

where $d(s_i - \tilde{x}) = \|s_i - \tilde{x}\|$ denotes the distance between the point S_i and $\tilde{x}$, r_e ($r_e < r$) is a measure of the uncertainty in sensor detection, $\alpha = d(s_i, \tilde{x}) - (r - r_e)$, and λ and β are parameters that measure detection probability.

We assume that sensors make observations independently. Then when an event takes place at x and it is observed by the sensors, the joint probability that this event is detected can be written as

$$C(\tilde{x}, S) = 1 - \prod_{s_i \in S} (1 - C(\tilde{x}, s_i)) \tag{3.2}$$

3.2. Cluster Heads Selection using Improved PSO

This work assumes sink have unlimited power supply to run the algorithm for sensor nodes and the CH selection using PSO is runed in the sink. Sink obtains the following information from sensor nodes:

1) Sensor node location: Sensor node may acquire location information from global positioning system (GPS) or predefined location. And node location does not change after deployment.

2) Initial energy level: Sensor node may obtain battery level through analog to digital converter (ADC) module and send the information to sink.

3) The sink can compute and simulate the remaining energy for each node after each cycle after knowing the initial energy level. Therefore, to save energy, sensor nodes do not need to transmit energy information to the base station.

Generally, the cluster heads selection using improved PSO selects k number of cluster heads from network with N number of sensor nodes. Therefore, there are C_N^k number of combinations. The chance for each set of combination can be evaluated by following formula which overall output describe as fitness (3.5). Smallest fitness, represent the best combination among others.

$$f_{fitness} = \alpha f_1 + (1-\alpha) f_2 \tag{3.3}$$

$$f_1 = \sum_{i=1}^{N} E(n_i) / \sum_{m=1}^{M} E(CH_m) \tag{3.4}$$

$$f_2 = 1 / \sum_{i=1}^{N-M} C(\tilde{x}, S) \tag{3.5}$$

where f_1 is the energy representative part, and it is equal to the sum of all member node energy $E(n_i)$ (not including N is the maximum number of iterations up to which stagnation can be tolerated) divided by the sum of all cluster heads energy E (CH_m). f_2 represents the coverage. A particle represents a possible cluster, based network formation. The particle is consisted of a set of cluster heads which are randomly selected from the networks. The flow for the cluster heads selection using PSO can be described as follow:

Procedure Cluster Heads Selection using Improved PSO
begin
Randomly initialize numbers of particles with *k*-dimension which represents a set of possible cluster heads distribution.
while the maximum number of iterations is not reached
begin
Calculate fitness for each particle using formula (3.3), (3.4) and (3.5)
Each particle updates its local best and global best value
Update velocity and position for each cluster heads in particle using (2.7)
end
Sink broadcasts the qualify cluster heads candidates to the network
end

Set-up phase from LEACH will be implemented after the sink assigns the cluster heads candidates. Selected cluster heads will broadcast advertisement message with same signal strength to other nodes. Nodes will join cluster head with the strongest signal strength because strong signal strength means the cluster heads is nearer so the transmission energy is minimal.

4. Simulation Results

To evaluate the performance of proposed algorithm compared to LEACH protocol, the simulation experiments are carried out in MATLAB 7.8.0. For fair comparisons the same simulation topology was used. The 100 sensor nodes with equal initial energy are distributed in a 100m×100m

network area and the sink is located at coordinates (50, 50). The parameters of the first-order radio model are given in Table 4.1.

Table 4.1 — the table of the parameter and its initial value

Parameter	**Value**
Network	200 m×200 m
Sink location	X=50 m, y=50 m
Simulation round	200
Number of node	100
Cluster head probability, p	0.05
Initial energy, E_0	0.05J
Packet size l	4000bit
Transceiver energy, E_{elec}	50nJ/bit
Aggregation energy per bit, E_{DA}	5nJ/bit
Free space amplifier energy, ε_{fs}	10pJ/bit/m^2
Multipath amplifier energy, ε_{mp}	0.0013pJ/bit/bit/m^4

In Fig. 4.1, the first node dead round for proposed algorithm is 113 rounds while LEACH only can achieve 80 rounds and the simulation result shows that around 40% of lifetime improvement compare to classical LEACH protocol. However, the proposed algorithm loses to classical LEACH when numbers of functional nodes is below 45% of total nodes. In Fig 4.2, the energy consumption of the proposed algorithm at each round is stable before round 113, while LEACH is very fluctuant.

It can be shown from Fig4.1 and Fig 4.2 that the performance of proposed algorithm in term of network lifetime, energy consumption is better than LEACH before around round 113, the significant improvement is mainly due to a better cluster head selection approach. LEACH elect cluster heads based on probability model and the nodes which acted as head cluster in current round are no longer elected themselves as head clusters in follow 1/p round, therefore it may form such cluster heads distrubite which will drain more energy from the nodes. Meanwhile the proposed algorithm considers critical factors such as energy and coverage to select better cluster heads among all nodes.

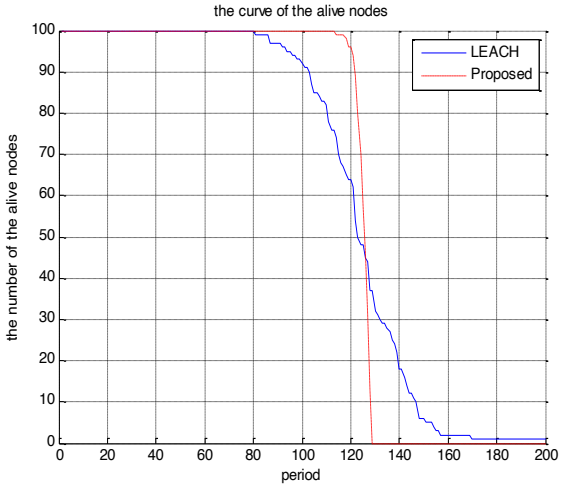


Figure 4.1 – The curve of the alive nodes

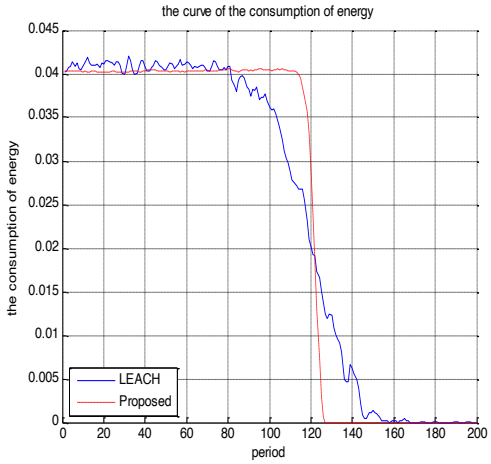


Figure 4.2 – The curve of the consumption of energy

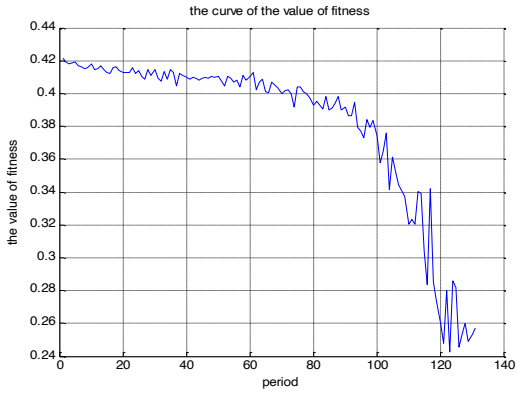


Figure 4.3 – The curve of the best value of fitness for PSO

As shown in Fig 4.4, the cluster heads distribution of the proposed algorithm is more uniform than LEACH at round 30 and 110. it testified that the consideration of coverage according to Eq.3.2 is effective.

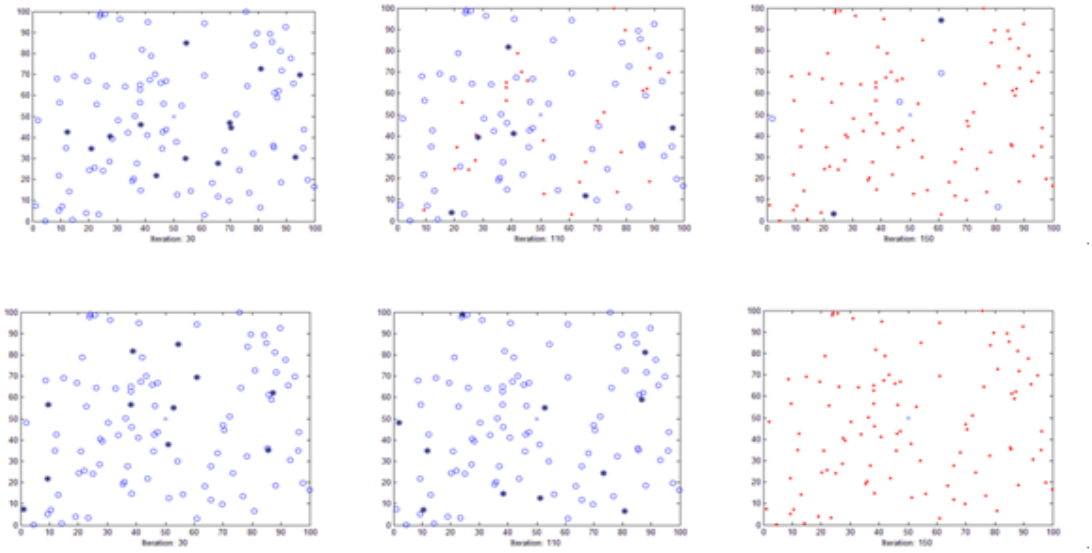


Figure 4.4 – The graph of the comparison between LEACH and the Proposed Algorithm at round 30, 110 and 150

5. Conclusion

In this paper, cluster heads selection algorithm based on energy and coverage using improved PSO is proposed. In conclusion, the performance of the proposed algorithm is compared with classical LEACH protocol. The simulation results show that proposed algorithm have better performances than LEACH in terms of first node die round and energy consumption per round. Contrasting improvement of proposed algorithm over LEACH is mainly due to consideration of energy and coverage of all sensor nodes around the network.

REFERENCES

1. Cecílio, J., Furtado, P. (2014). Wireless Sensor Networks: Concepts and Components. In: Wireless Sensors in Heterogeneous Networked Systems. Computer Communications and Networks. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09280-5_2.

2. G. Xu, W. Shen, X. Wang, Applications of wireless sensor networks in marine environment monitoring: a survey. Sensors (Switzerland) 14(9) (2014). https://doi.org/10.3390/s140916932.

3. Bushra Rashid, Mubashir Husain Rehmani, Applications of wireless sensor networks for urban areas: A survey, Journal of Network and Computer Applications, Volume 60,2016,Pages 192-219, ISSN 1084-8045,https://doi.org/10.1016/j.jnca.2015.09.008.

4. Jondhale, S.R., Maheswar, R., Lloret, J. (2022). Fundamentals of Wireless Sensor Networks. In: Received Signal Strength Based Target Localization and Tracking Using Wireless Sensor Networks. EAI/Springer Innovations in Communication and Computing. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-74061-0_1.

5. W. B. Heinzelman, A. P. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, “An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks,” IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 1, issue 4, Oct. 2002, pp. 660-670.

6. Zhan Wei Siew, Chen How Wong, Cluster Heads Distribution of Wireless Sensor Networks via Adaptive Particle Swarm Optimization, 2012 Fourth International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks, 2012, pp. 79-85.

7. Xie, X. F., Zhang, W. J., Yang, Z. L. Adaptive particle swarm optimization on individual level, In Proceedings of International Conference on Signal Processing (2002), 1215-1218.

8. Swagatam Das and Amit Konar, Improving Particle Swarm Optimization with Differentially Perturbed Velocity, GECCO’05, June 25-29, 2005, Washington, DC, USA. Pp. 177-185.

9. El-Shorbagy, M. & Hassanien, Aboul Ella. (2018). Particle Swarm Optimization from Theory to Applications. International Journal of Rough Sets and Data Analysis. 5. 10.4018/IJRSDA.2018040101.

УДК 621.643.053 DOI: 10.37816/eeste-2024-1-108-117

УПРАВЛЕНИЕ РИСКОМ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОПАСНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
RISK MANAGEMENT WHEN OPERATING HAZARDOUS TECHNICAL SYSTEMS

Любовь Валерьевна Волкова, Иван Михайлович Иванов

Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), Россия, Москва
The Kosygin State University of Russia, Russia, Moscow
(e-mail: volkova-lv@rguk.ru, 231729@stud.rguk.ru)

Аннотация: Рассмотрены вопросы эффективности мер, обеспечивающих снижение риска эксплуатации опасных технических систем с высоким уровнем износа. Указанные меры на снижение риска можно разделить на две группы - меры предупреждения риска и меры по его смягчению. При этом приведенные к году издержки, представляющие собой сумму приведенных затрат на меры снижения риска и приведенного ущерба от аварий, при некоторой величине затрат на снижение риска принимают минимальное значение, превышение указанного уровня затрат не компенсирует дополнительных затрат на его снижение. Поиск указанного уровня затрат на снижение риска от аварий, при котором издержки минимальны, является оптимизационной задачей по минимизации приведенных к году издержек, связанных с риском.

Abstract: The issues of the effectiveness of measures to reduce the risk of operating hazardous technical systems with a high level of wear are considered. These risk reduction measures can be divided into two groups - risk prevention measures and risk mitigation measures. At the same time, the annualized costs, which are the sum of the reduced costs for risk reduction measures and the reduced damage from accidents, at a certain amount of risk reduction costs take on a minimum value; exceeding the specified level of costs does not compensate for the additional costs of reducing it. Finding the specified level of costs for reducing the risk of accidents, at which costs are minimal, is an optimization task to minimize the costs associated with the risk, reduced to a year.

Ключевые слова: риск, опасная техническая система, меры предупреждения риска, авария

Keywords: risk, dangerous technical system, risk prevention measures, accident

Управление риском при эксплуатации объекта предполагает применение мер предупреждения аварий (диагностика, ремонт, замена) и мер смягчения их последствий (подавление и локализация аварии, спасательные меры). Кривые частоты аварий с разным уровнем возможного ущерба для рассматриваемого объекта в логарифмических координатах могут быть представлены семейством кривых, построенных для разных уровней затрат на меры безопасности (рис. 1) [1 - 3].

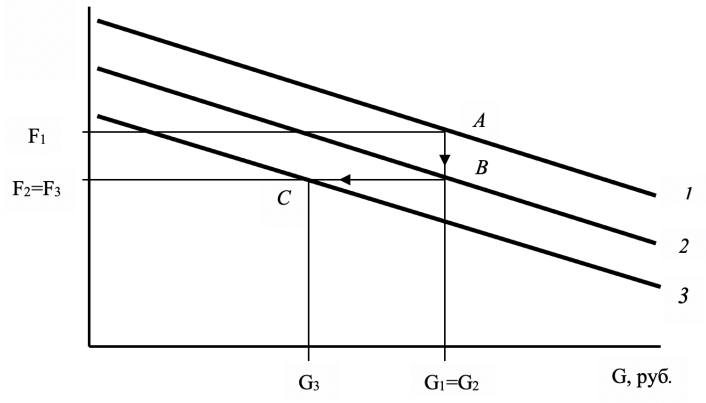


Рисунок 1 — Рисунок 1 – Схема управления риском ущерба от аварий:
F – частота аварий; G – ущерб от аварий; АВ – процесс реализации мер на предупреждение риска;
ВС – процесс реализации мер на смягчение риска;
1 – кривая без затрат на снижение риска; 2 – кривая с учетом затрат на меры предупреждения аварий;
3 – кривая с учетом

Реализация мер предупреждения, главным образом, приводит к уменьшению частоты аварии, а мер смягчения последствий аварий – к уменьшению ущерба [4-6].

Прогнозирование риска, сравнение его с приемлемым уровнем и обоснование мер для его снижения (предупреждение и смягчение последствий аварий), – суть управления безопасностью объекта на всех этапах жизненного цикла объекта. Инвестирование затрат на управление риском можно представить в виде последовательности процедур, реализация которых позволяет снижать ущерб и частоту аварий при эксплуатации объекта. Обоснование эффективности затрат на снижение риска является важным методологическим вопросом [5]. Оно может быть получено на основе минимизации приведенных к году издержек, включающих в себя приведенные затраты на снижение риска аварий и приведенный ущерб от аварий при данном уровне риска. Возможный ущерб от аварий при этом можно представить, как функцию от затрат на снижение риска аварий, при этом эффективность затрат тем выше, чем ниже величина суммарных издержек, связанных с риском. Целевую функцию оптимизации уровня издержек с увеличением затрат на снижение риска можно записать с использованием знака «квантор существования» в виде:

$$\exists(C+У) = \min\,(C+У),\ \text{при этом: } С_{эф};\ У_{пр}. \qquad (1)$$

где *С* – приведенные затраты на снижение риска, *руб./год*; *У* – приведенный ущерб (риск ущерба)*, руб./год*; $С_{эф}$ - эффективный уровень затрат на снижение риска, *руб./год;*

$У_{пр}$. – приемлемый риск ущерба, *руб./год.*

При достигнутом минимуме суммарных издержек величина приведенных затрат на снижение риска является эффективной $С_{эф}$, а риск ущерба соответствует его приемлемому значению $У_{пр}$. Сумма приведенных к году ущерба от аварий (риска ущерба) и приведенных затрат на меры по его снижению может иметь следующий вид, представленный на рисунке 2 [7, 8].

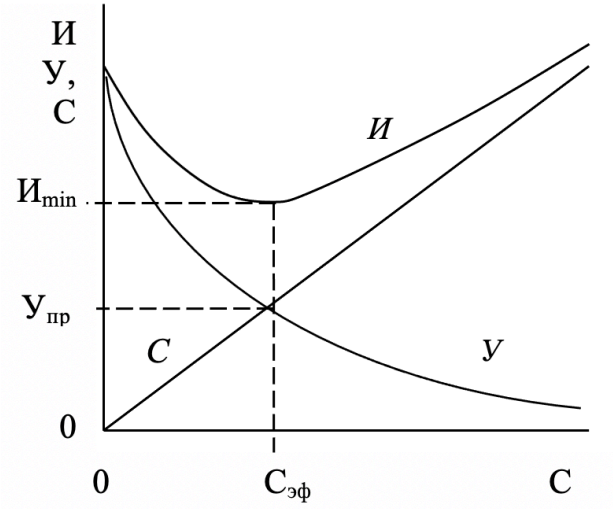


Рисунок 2 — Рисунок 2 – Зависимость суммарных приведенных издержек от приведенных затрат на меры по повышению безопасности: С – приведенные к году затраты на меры по снижению риска; У – ущерб (риск ущерба) от аварий; И – суммарные издержки (И=У + С*)*; $С_{эф}$ – эффективная величина затрат на меры по снижению риска; $У_{пр}$– приемлемый уровень риска ущерба

В условиях ограниченных ресурсов в качестве мер предупреждения аварий потенциально опасных технических систем особенно актуален неразрушающий контроль технического состояния указанных систем без их остановки. Примерами таких потенциально опасных систем являются магистральные нефтепроводы, газопроводы и промышленные железобетонные дымовые трубы [1, 9, 10].

Неразрушающий контроль технического состояния функционирующих магистральных нефте- и газопроводов проводится путем пропуска внутри трубопроводов инспекционных снарядов, способных при движении зафиксировать дефекты (трещины, коррозии стенки, нарушения геометрии проходного сечения). Наиболее часто используются инспекционные снаряды на базе магнитных и акустических способов НК [11, 12].

Магнитный способ контроля функционирующего трубопровода

В основе внутритрубного магнитного НК лежит регистрация магнитных полей рассеяния от изменений плотности и непрерывности магнитного материала с помощью датчиков, расположенных на снаряде [10].

Снаряд включает в себя 3 секции, объединенные с помощью шарниров в единую цепь, как показано на рисунке 3 [6].

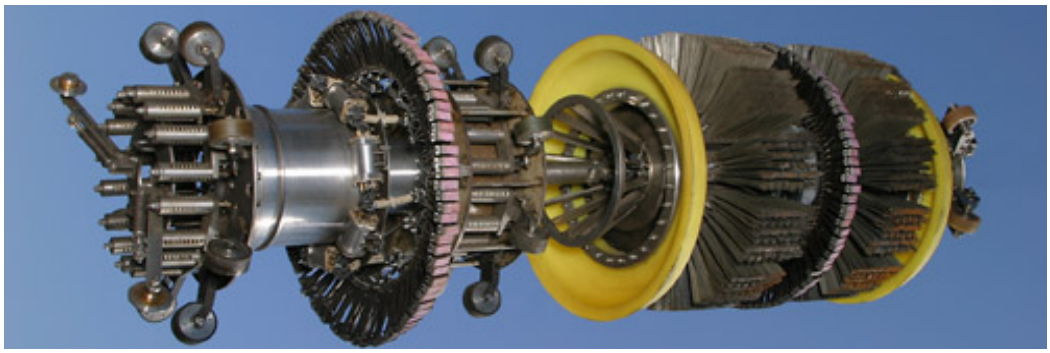


Рисунок 3 — Общий вид магнитоскана

Напряженность магнитного поля под датчиком пропорциональна толщине стенки трубы. Между двумя группами постоянных кольцевых магнитов, образованных двумя группами проволочных щеток, в трубопроводе существует продольный магнитный поток. Кольцевая система датчиков расположена между щетками, она обеспечивает прижимание

датчиков к внутренней поверхности трубопровода. Манжеты из эластичного материала обеспечивают перепад давления, необходимый для движения снаряда.

Снаряд запускается в трубопровод через устройство пуска-приемки, далее он движется в потоке нефтепродукта, записывая информацию о дефектах на диск бортового компьютера. Далее, информация обрабатывается, компьютерной программой распознаются дефекты, затем данные анализируются специалистом.

Компьютерная программа позволяет автоматически идентифицировать до 10 типов дефектов с привязкой их координат. При нарушениях непрерывности материала возникают искривления силовых магнитных линий вблизи дефектов, что можно видеть на рисунке 4 [10,12].

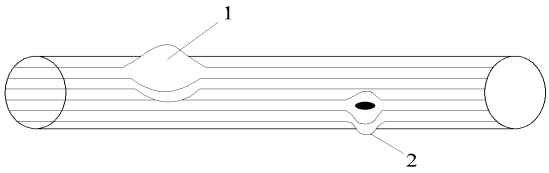


Рисунок 4 — Схема магнитного поля вблизи дефектов трубопровода:
1 – внешний дефект; *2* – внутритрубный дефект

Ультразвуковой контроль функционирующего нефтепровода.

Ультразвуковая дефектоскопия основана на закономерностях распространения, затухания, отражения, рассеяния, трансформации и дифракции упругих волн в твердых телах [11]. Способ реализуется при пропускании внутри трубопровода инспекционного снаряда с установленными на нем ультразвуковыми датчиками, средствами измерений, обработки и хранения данных измерений.

Ультразвуковой снаряд позволяет получить более точную и полную информацию о состоянии трубопровода по сравнению со способом внутритрубной магнитной диагностики, так как дает возможность контролировать большую толщину металла (более 100 мм) и выявлять дефекты малой ширины раскрытия. Ультразвуковой снаряд обеспечивает контроль материалов с высокой разрешающей способностью.

Ультразвуковой внутритрубный снаряд снабжен манжетами спереди и сзади. Их расположение гарантирует оптимальный ультразвуковой контроль стенки трубопровода. Ультразвуковые снаряды с разной степенью эффективности могут быть использованы для трубопроводов, перекачивающих жидкие среды. Схема ультразвукового снаряда представлена на рисунке 5 [6].

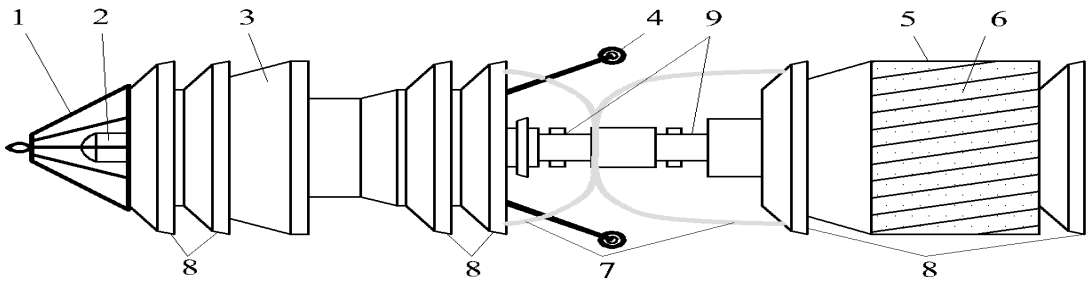


Рисунок 5 — Схема ультразвукового снаряда:1 – бампер; 2 – антенна приемопередатчика;
3 – коническая манжета; 4 – колесо одометра; 5 – носитель датчиков; 6 – датчики;
7 – шланги для омывания датчиков; 8 – манжеты; 9 – карданы

Основными преимуществами способа ультразвуковой внутритрубной диагностики являются: непосредственное измерение размеров; высокая точность измерений; обнаружение геометрии дефектов; координатная привязка дефектов; контроль любого материала; визуализация.

К недостаткам данного вида НК относятся повышенная чувствительность к загрязнениям стенок и неоднородности жидкости.

Инструментальные виды НК функционирующих дымовых труб.

Основными способами инструментального НК дымовых труб, применяемых комплексно, являются: термовизионный контроль всплесков температурного поля на внешней поверхности дымовой трубы; динамические испытания для экспериментального определения параметров собственных колебаний ствола трубы; фотографирование футеровки с помощью автономного аппарата [10] .

Термовизионный контроль дымовых труб проводится с целью определения мест, в которых нарушена герметичность футеровки и бетона ствола трубы. Указанные места проявляются на термограмме внешней поверхности функционирующей дымовой трубы зонами с повышенными температурами (рисунок 6) [8].

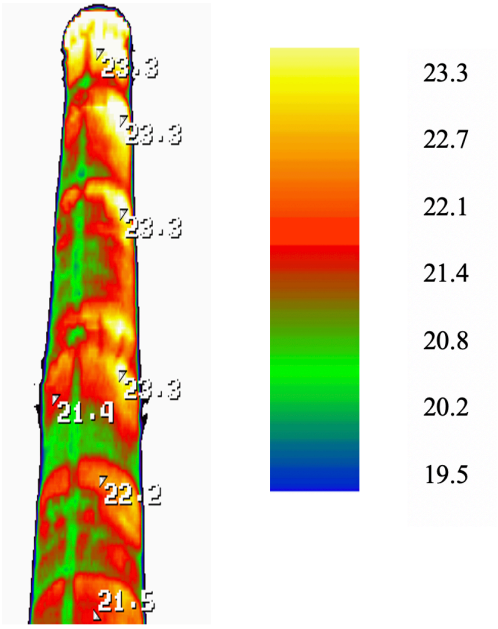


Рисунок 6 — Термограмма наружной поверхности железобетонной дымовой трубы высотой 100 м (слева) и шкала температур (справа):
цифрами показаны точки отдельных всплесков температур до 23.3 °С

Достоинствами способа термовизионного контроля являются: возможность обнаружения скрытых дефектов, в частности, дефектов в футеровке; возможность классификации дефектов по степени их опасности. Недостатками термовизионного контроля являются: трудность привязки инфракрасных изображений к видам дефектов; сложность осмотра верхней части трубы из-за ограниченного угла зрения.

Динамические испытания дымовой трубы

При динамических испытаниях экспериментально определяют пространственную жесткость трубы [10, 11] и соответственно частоту ее собственных колебаний. При старении материала дымовой трубы, появлении внутренних дефектов, нарушении связей между конструктивными элементами труба может утрачивать свою жесткость, что приводит к изменению частоты собственных колебаний по сравнению с ее проектными (теоретическими) значениями. Пропорционально снижению частоты собственных колебаний трубы снижается ее остаточный ресурс.

Свободные колебания балки описываются известным уравнением:

$$\frac{E J_x}{q} \frac{\partial^4 y(z,t)}{\partial z^4} + \frac{\partial^2 y(z,t)}{\partial t^2} = 0, \qquad (2)$$

где E – модуль упругости, МПа; J_x – момент инерции сечения балки, м^4; q – масса погонного метра балки, кг/м.

Рассматривая дымовую железобетонную трубу высотой h как консоль (с распределенной массой) и решая уравнение (3) для консоли, можно получить теоретическую зависимость для периода собственных колебаний первого тона для трубы:

$$T_1 = \frac{h^2}{\pi^2}\sqrt{\frac{q}{EJ_x}}, \quad (3)$$

Для оценки степени износа теоретические значения частот собственных колебаний следует сравнить со значениями аналогичных характеристик, но полученны в эксперименте – в результате динамических испытаний трубы. где h –высота, м; m – масса погонного метра балки, кг/м.

По изменениям собственных частот колебаний можно судить о ресурсе трубы.

Динамические испытания трубы проводятся с использованием беспроводного диагностического комплекса «Стрела-2» (рис. 7) [11].

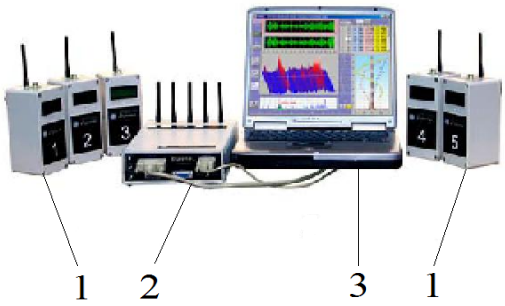


Рисунок 7 — Диагностический комплекс «Стрела-2»: 1 – измерительные модули; 2 –аналого-цифровой преобразователь; 3 – компьютер

Диагностический комплекс «Стрела-2» представляет собой аппаратный комплекс для получения экспериментальных амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) сооружения и анализа изменения жесткости путем сопоставления экспериментальных характеристик с аналогичными расчетными (проектными) характеристиками [9].

Вибрационные датчики позволяют испытывать высотные сооружения с большим периодом собственных колебаний [8, 9]. Радиосигналы от датчиков поступают в компьютер, находящийся на расстоянии до 1 км.

Трехканальный блок модуляции принимает сигналы от датчиков и осуществляет модуляцию по частоте сигнала радиопередатчика для дальнейшей передачи на центральный узел. Сигнал радиопередатчика после детектирования в виде трех аналоговых сигналов поступает в компьютер, где классифицируется с помощью специальной компьютерной программы.

Данный метод используется для получения графического представления полученных данных колебаний ствола дымовой трубы и выявления дефектов в нем. Объемы измерений зависят от размеров трубы, срока ее эксплуатации, дефектов в ее конструкции. Датчики закрепляются на трубе с определенным шагом по высоте.

Результаты измерений оформляются в виде эпюр ускорений. Эпюра по трем тонам представлена на рисунке 8.

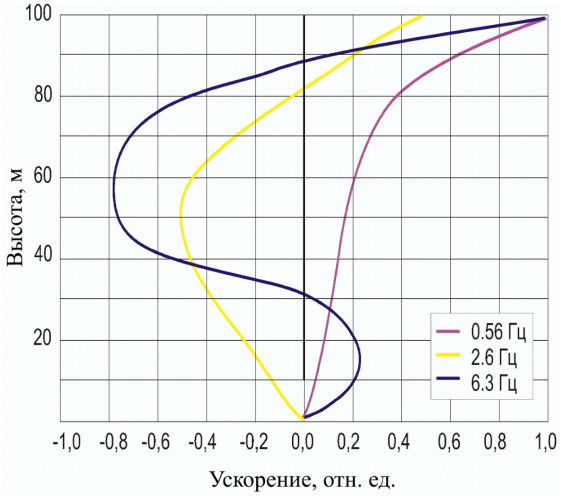


Рисунок 8 — Ускорения на резонансных частотах трех основных тонов:
f_1= 0,56; f_1= 2,6; f_1= 6,3 Гц.
Ускорения выражены их отношениями к их максимальным значениям
на максимальной высоте трубы (H=100 м)

Результаты расчета собственных частот и остаточного ресурса трубы представлены на рисунке 9.

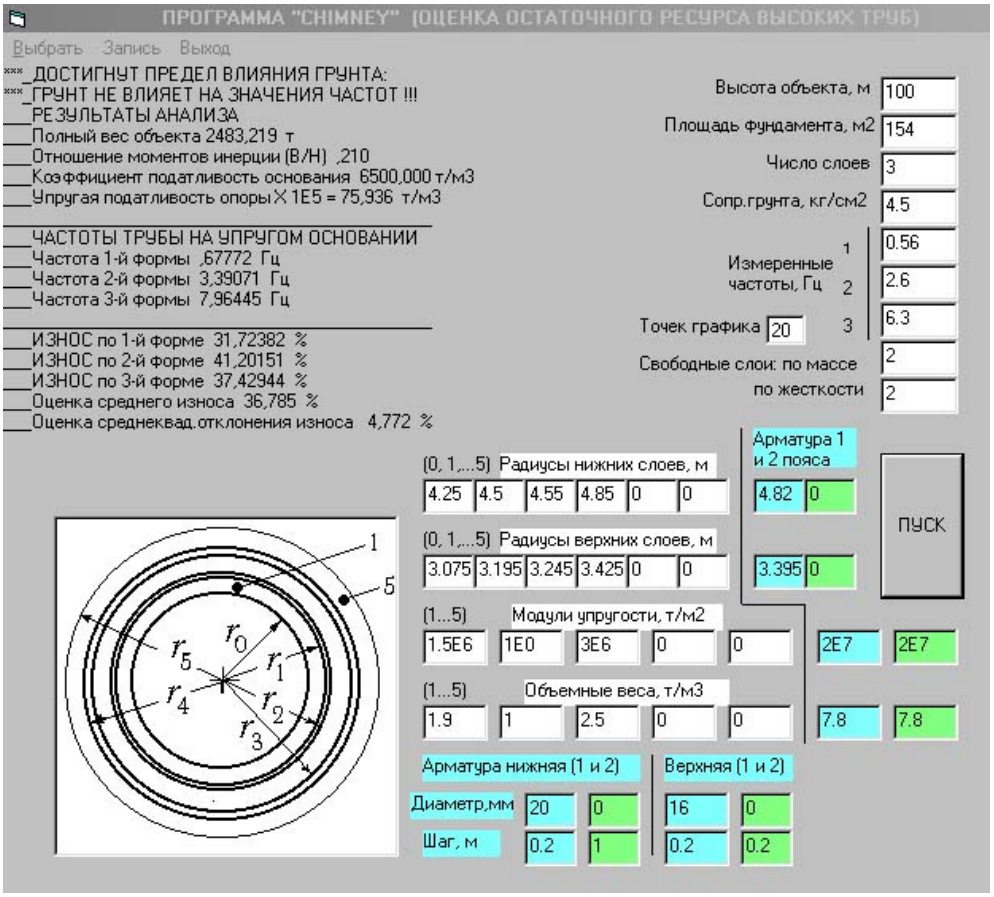


Рисунок 9 — Результаты оценки остаточного ресурса железобетонной дымовой трубы высотой 100 м цеха обжига извести ЗСМК, полученные с использованием программы CHIMNEY

По результатам экспериментального определения АЧХ можно сделать вывод о том, что частота и соответственно ресурс уменьшились по сравнению с расчетными значениями на

36,7 % [8, 9]. Эпюры ускорений трубы на частоте первого тона не имеют искривлений. Эпюры на частотах второго и третьего тона имеют правильные очертания, что свидетельствует об отсутствии серьезных дефектов и повреждений железобетонного ствола.

Результаты динамических испытаний дымовой трубы сравниваются с результатами, полученными с использованием других методов диагностики (термовизионного контроля и диагностикой методами излучений) [10], что позволяет выявить дефекты и причины повреждений отдельных частей и конструкций труб.

Внутритрубный контроль функционирующих железобетонных дымовых труб с использованием автономного аппарата. Обследования футеровок функционирующих дымовых труб в течение последних 18-ти лет выполняются методом оптического контроля с помощью автономного аппарата [7].

Автономный аппарат, подвешенный на тросе по типу маятника, опускается внутри функционирующей дымовой трубы в условиях высокой температуры газов (от 150 до 300 °С) и восходящего закрученного потока дымовых газов, одновременно, производит послойную съемку внутренней поверхности трубы (рис. 10).

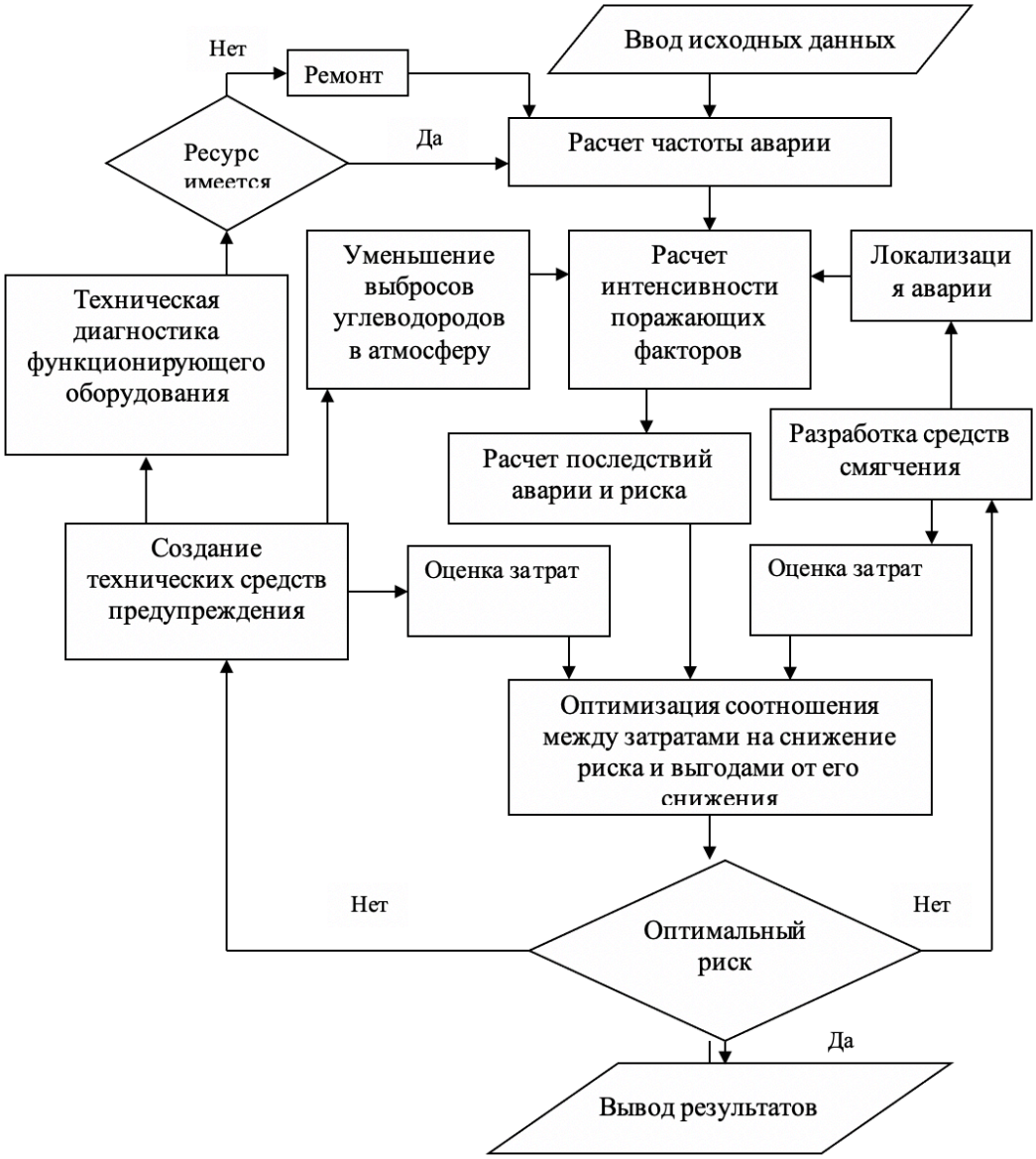


Рисунок 10 — Автономный аппарат поднят краном над устьем дымовой трубы для последующего его опускания в железобетонную дымовую трубу:
между дисковыми аэродинамическими стабилизаторами по периметру корпуса автономного аппарата расположены излучатели;
под нижним аэродинамическим стабилизатором по периметру установлены приемные фотокамеры

Автономный аппарат при его спуске производит послойное фотографирование внутренней поверхности дымовой трубы и запись фотографической информации с привязкой ее к координатам поверхности и времени съемки. Полученная информация является объективной и может сопоставляться с аналогичной информацией, полученной в другое время или другими методами НК. Это заметно повышает качество прогнозирования безопасности дымовой трубы.

Управление безопасностью дымовой трубы может быть представлено в виде схемы алгоритма (рис 11) [10].

Поиск решения осуществляется в условиях дефицита и неопределенности информации. В силу погрешностей, которые присутствуют при оценке риска и мер по его снижению до приемлемого уровня, невозможно говорить о конкретной величине указанного уровня, очевидно, речь должна идти об интервалах приемлемости риска и эффективности затрат на меры снижения риска.



Выводы. В условиях ограниченных ресурсов для предупреждения аварий потенциально опасных технических систем с высокой степенью износа рекомендуется применение методов неразрушающего контроля (НК) безопасности при их функционировании.

Предложена целевая функция оптимизации издержек, связанных с риском, при эксплуатации опасной технической системы, позволяющая оценить затраты, необходимые для достижения приемлемого риска ущерба. НК функционирующих магистральных нефтепроводов осуществляется с применением магнитных и ультразвуковых снарядов. Для НК функционирующих промышленных железобетонных дымовых труб применяются комплексно три метода: внешний термовизионный контроль; фотографирование футеровки с применением автономного аппарата; экспериментальное определение амплитудно-частотных характеристик.

В работе представлен алгоритм управления риском функционирующей промышленной железобетонной дымовой трубы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акатьев В.А. Приоритеты в выборе мер при управлении промышленной безопасностью объектов энергетики // Электрические станции. – 2006. – № 5.– С.7 – 14.

2. Сущев С.П. Программное обеспечение расчетов физического износа дымовых труб [Текст] / С.П. Сущев. – Уфа : Изд-во МНТЦ «БЭСТС», 2003. – 18 с.

3. Акатьев В. А., Сущев С. П., Колючкин В. Я. и др. Способ контроля внутренней поверхности дымовой трубы и устройство для его осуществления. Патент № 2152065, 2000.

4. Петинов С. В., Сидоренко В. Г. Обзор методов дефектоскопии при обследовании трубопроводов // Молодой ученый. — 2016. — №2. — С. 194-199.

5. Подсекин, А.К. Физические основы ультразвуковых методов неразрушающего контроля : учеб. пос. [Текст] / А.К. Подсекин. – Обнинск, 1991. – 73 с.

6. Баранов, В.М. Диагностика материалов и конструкций топливно-энергетического комплекса: учеб. пос. [Текст] / В.М. Баранов, А.М. Карасевич, Е.М. Кудрявцев и др. – М.: Энергоатомиздат, 1999. – 360 с.

7. Акатьев В.А., Александров А.А., Волкова Л.В., Сущев С. П..Способ контроля внутренней поверхности дымовой трубы и устройство для его осуществления / Патент № 2545062 РФ, заявл. 26.08.2013; опубл. 27.03.2015, Бюл. № 9. – 19 с.

8. Акатьев В.А., Александров А.А., Сущев С.П., Волкова Л.В. Модернизация технологии внутреннего мониторинга функционирующей дымовой трубы: монография. – М.: РГСУ, 2014. – 104 с.

9. Акатьев В.А., Метелкин Е.В., Нигметов Г.М. Методы и средства оценки и снижения сейсмического риска. Обзор / Безопасность в техносфере. 2016. №5. С.75-86.

10. Александров А.А., Акатьев В.А., Ларионов В.И., Сущев С.П., Волкова Л.В. Повышение эффективности контроля дымовых труб с помощью автономного аппарата / Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2017. № 1 (112). С. 24-40.

11. Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле. (пер. с англ. Пановко Я.Г.). Изд. 2-е, стереотип. – М.: Комкнига, 2006. – 440 с.

12. Шмаков, В. А., Смирнов Ю. Н., Гиззатуллин Р. Р. Планирование ремонта магистральных трубопроводов по результатам внутритрубной диагностики // Роль науки в развитии топливно-энергетического комплекса. Матер. научн. – практ. конф. 24 октября 2007 г. – Уфа, 2007. – С. 90–92.

УДК 621.928.92 DOI: 10.37816/eeste-2024-1-118-121

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНУТРЕННЕЙ АЭРОДИНАМИКИ ЦИКЛОНА — СЕПАРАТОРА ДЛЯ ОЧИСТКИ ВЫБРОСОВ ОТ ЛЕТУЧЕЙ ЗОЛЫ
NUMERICAL SIMULATION OF THE INTERNAL AERODYNAMICS OF A CYCLONE - SEPARATOR FOR CLEANING EMISSIONS FROM FLY ASH

Анна Павловна Полиефтова, Олег Иванович Седляров, Михаил Павлович Гуськов, Дарья Владимировна Шевко, Алексей Валерьевич Фролов, Евгения Васильевна Багдасарян
Anna P. Polieftova, Oleg I. Sedlyarov, Mikhail P. Guskov, Daria V. Shevko, Aleksey V. Frolov, Evgenia V. Bagdasaryan

Российский Государственный Университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство) Россия, Москва
The Kosygin State University of Russia, Russia, Moscow
(e-mail: sedlyarov-oi@rguk.ru)

Аннотация: Проведено моделирование внутренней аэродинамики циклона сепаратора для очистки выбросов от летучей золы. На примере аппарата, проведен полный цикл моделирования с использование свободного программного обеспечения.

Abstract: The internal aerodynamics of a separator cyclone for cleaning emissions from fly ash was simulated. Using the device as an example, a full cycle of simulation was carried out using free software.

Ключевые слова: циклона сепаратора для очистки выбросов от летучей золы, системы пылеулавливания, внутренняя аэродинамика, инерционные и центробежные пылеуловители, свободное программное обеспечение

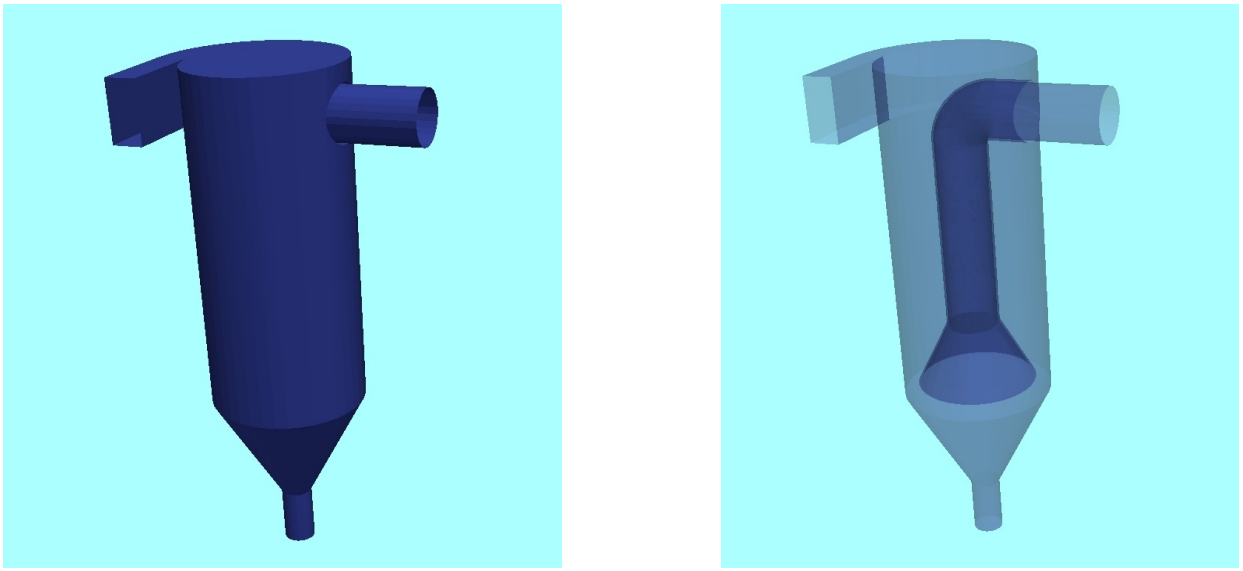
Keywords: Ash cyclone separator, dust collection systems, internal aerodynamics, inertial and centrifugal dust collectors, free software.

В настоящее время для моделирования процессов пылеулавливания широко используется современное программное обеспечение, предназначенное для решения задач вычислительной гидродинамики (computational fluid dynamics, CFD). Значительное число исследований выполнено с использованием современных коммерческих программных продуктов, характерной особенностью которых является высокая стоимость базового программного обеспечения и, как правило, необходимость дополнительных затрат для расчетов на многопроцессорных системах. Большинство исследований ограничивается рассмотрением конкретного аппарата или одной ступени многоступенчатого устройства.

Целью настоящей статьи является представление результатов моделирования с использованием свободного программного обеспечения внутренней аэродинамики инерционных и центробежных пылеулавливающих аппаратов, а именно аппарата для очистки выбросов от летучей золы, который в англоязычной терминологии называется Fly Ash cyclone separator или просто Ash cyclone separator.

На основе документации была создана 3D модель аппарата. На рисунке 1 представлена 3D модель пылеулавливающего аппарата для очистки выбросов от летучей золы.

Затем, с использованием утилиты snappyHexMesh (OpenFOAM), была создана конечно-объемная расчетная сетка (Mesh) для области течения внутри модели циклона - сепаратора. В качестве базовой сетки использовалась сетка с размерами 510 x 360 x 990 мм и количеством ячеек 75 x 40 x 60 по осям X, Y, и Z, соответственно. В результате работы утилиты snappyHexMesh (OpenFOAM) общее количество расчетных ячеек составило 121 451 шт.



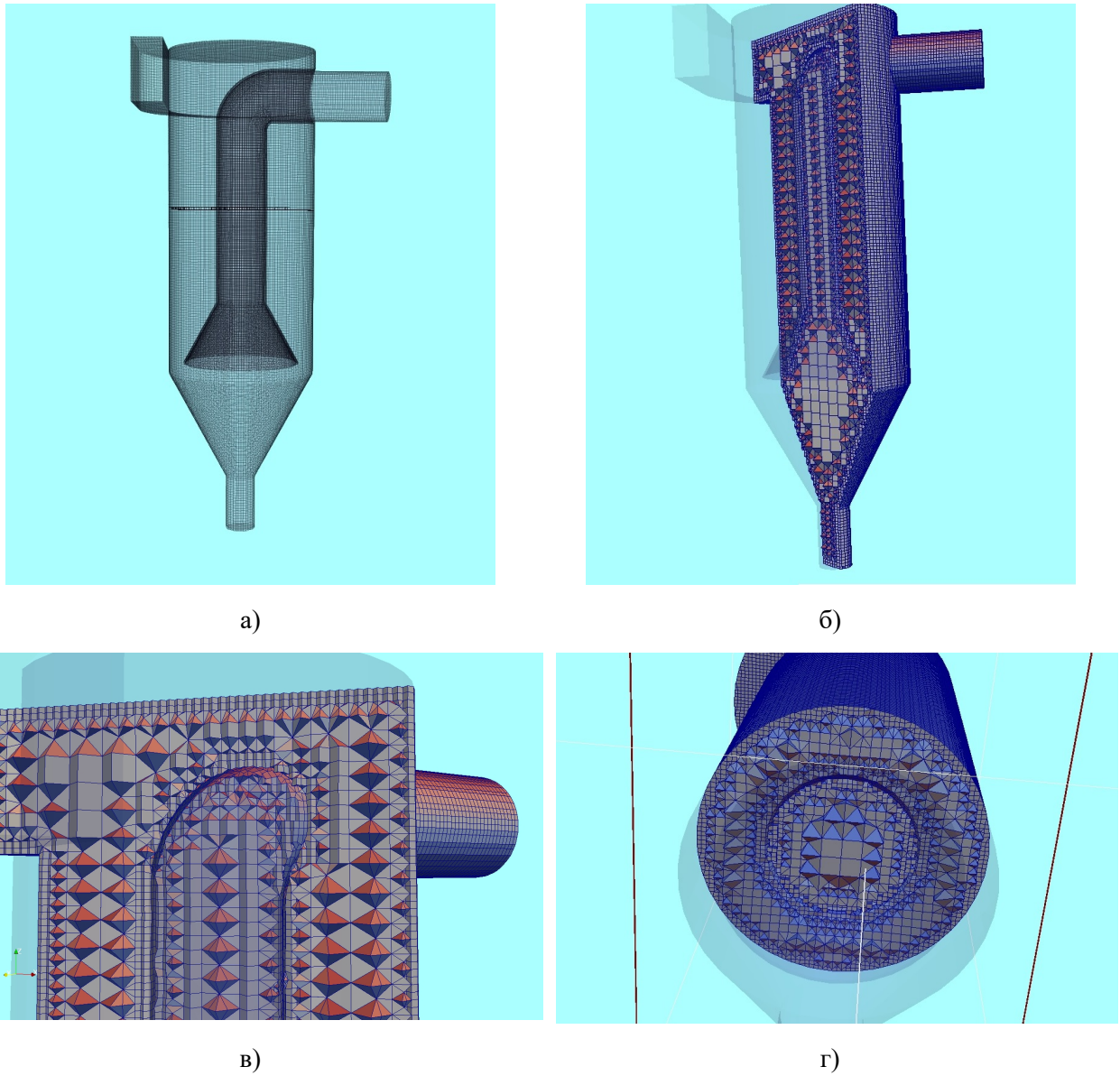
а) б)

Рисунок 1 — 3D модель циклона сепаратора для очистки выбросов от летучей золы (Ash cyclone separator):
а – внешний вид аппарата; б – внутреннее устройство аппарата

На рисунке 2 представлено разбиение внутренней области циклона – сепаратора, как для аппарата в целом (рисунок 2а) и 2б), так и отдельных областей (рисунок 2в) и 2г). Отчетливо видно, что в областях, прилегающих к стенкам аппарата, т.е. в областях максимальных изменений характеристик течения, происходит сгущение расчетной сетки и уменьшение объема расчетных ячеек.

Для изучении внутренней аэродинамики двухступенчатого пылеуловителя решалась система нестационарных дифференциальных уравнений, включающая в себя уравнение состояния, уравнения сохранения массы и количества движения (импульса), уравнения переноса, определяемые соответствующими физическими моделями (например, моделями турбулентности и другими) с соответствующими начальными и граничными условиями, позволяющими однозначно определить условия задачи [1,2].

В настоящее время для численного решения систем дифференциальных уравнений в частных производных широко применяются три основных метода: метод конечных разностей, метод конечных (контрольных) объемов и метод конечных элементов. Первый из них метод конечных разностей (Finite Difference Method – FDM), основанный на замене производных конечными разностями. Второй метод – метод конечных или контрольных объемов (Finite Volume Method – FVM) состоит в разбиении исследуемой области расчетной сеткой на совокупность замкнутых объемов. Для каждого из таких объемов должны выполняться вышеперечисленные законы сохранения. Все изменения в контрольном объеме происходят только за счет потоков через поверхности, ограничивающие данный контрольный объем или за счет их генерации внутри этого объема. Решение уравнений переноса ищется в узлах, которые расположены, как правило, в центрах контрольных объемов. Третий метод – метод конечных элементов (Finite Element Method – FEM) состоит в разбиении расчетной области на конечное число подобластей (конечных элементов) и заданием аппроксимирующей функции внутри каждого элемента. Коэффициенты аппроксимирующих функций выражаются через значение функций в узлах элементов. Таким образом, получается система алгебраических уравнений, в которой число неизвестных равно количеству уравнений [1].



а) б)

в) г)

Рисунок 2 — Расчетная сетка

В качестве модели турбулентности для предварительных расчетов использовалась модель *V2F*. В качестве граничных условий была задана скорость потока на входе в аппарат, которая составила 15 м/с.

Для решения поставленной задачи был использован программный пакет OpenFOAM [3], представляющий собой свободно распространяемый инструментарий, предназначенный для решения задач вычислительной гидродинамики.

В заключении исследований был проведен анализ результатов расчетов. Современное программное обеспечение позволяет не только оценить численные результаты расчетов, но провести их обработку и визуализацию.

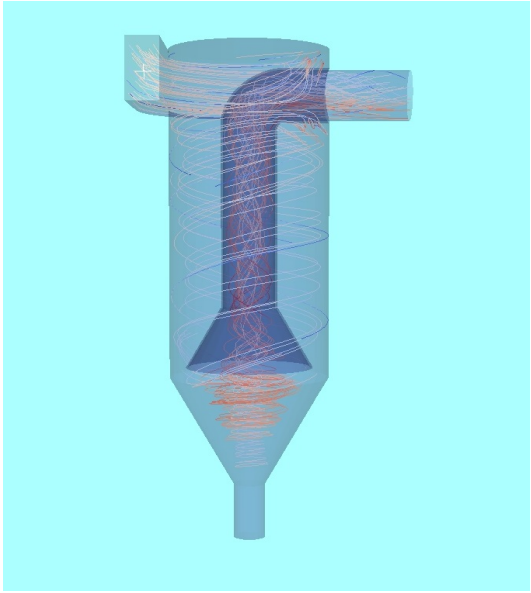


Рисунок 3 — Трехмерная визуализация поля течения внутри аппарата (линии тока)

Представленный в данном исследовании подход к исследованию внутренней аэродинамики пылеулавливающего аппарата для очистки выбросов от летучей золы с использованием свободного программного обеспечения позволяет на стадии проектирования изучить процессы, происходящие внутри аппаратов, а также наметить возможные пути оптимизации и оценить эффективность каждого из них.

Задачами дальнейших исследований будет являться моделирование процесса пылеулавливания и определения общей и фракционной эффективности пылеулавливающего аппарата для очистки выбросов от летучей золы, а также оптимальной производительности в зависимости от концентрации летучей золы в очищаемом потоке.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Седляров О.И., Куранова С.В., Моргун О.С. и др. Численное моделирование процессов пылеулавливания в сухих гравитационных и инерционных пылеуловителях с использованием свободного программного обеспечения // Дизайн и технологии. – 2018, №67(109), с. 81-87

2. Численный алгоритм моделирования двухфазных течений с учетом сжимаемости, вязкости и массовых сил/ Крапошин М. В., Кухарский А. В., Корчагова В. Н., Шевелёв А. А. //Промышленные процессы и технологии. 2022. Т.2. No3(5). С.6–27.
DOI: 10.37816/2713-0789-2022-2-3(5)-6-27

3. The OpenFOAM Foundation: OpenFOAM: // [Электронный ресурс]. - URL: https://openfoam.org/

DOI: 10.37816/eeste-2024-1-122-128

A VEHICLE RE-IDENTIFICATION METHOD BASED ON RANDOM OCCLUSION
МЕТОД ПОВТОРНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА НА ОСНОВЕ СЛУЧАЙНОЙ ОККЛЮЗИИ

Fengjiao Gao*, Yumo Zhang, Tongjun Liu*, Changjiang Song***

**Heilongjiang Academy of Sciences Intelligent Manufacturing Research Institute, China, Harbin*
***Harbin Kejia General Machinery Co., Ltd., China, Harbin*
(e-mail: 411417247@qq.com)

Abstract: In the computer vision field, vehicle re-identification research is an important direction. There have been many researchers doing research on vehicle re-identification. But they mostly focus on the overall image and ignore occluded images, which may be more practical and challenging.This paper proposed a re-identification method to solve the occlusion in remote sensing image, which extracted the pixels in the random rectangular area of the image and covers them to other positions of the image. The feasibility of the proposed random occlusion method was proved by experiments on simulated occlusion images. And experiments on real occlusion image data sets showed that the proposed random occlusion method was better than the random erasure method in solving the occlusion problem, and can obtain better re-identification results.

Аннотация: В области компьютерного зрения важным направлением являются исследования по повторной идентификации транспортных средств. Многие исследователи проводили исследования по повторной идентификации транспортных средств. Но они в основном сосредотачиваются на общем изображении и игнорируют перекрытые изображения, что может быть более практичным и сложным. В этой статье предложен метод повторной идентификации для решения проблемы перекрытия в изображении дистанционного зондирования, который извлекает пиксели из случайной прямоугольной области изображения. и перекрывает их на другие позиции изображения. Целесообразность предложенного метода случайной окклюзии была доказана экспериментами на смоделированных изображениях окклюзии. А эксперименты с наборами данных реальных изображений окклюзии показали, что предложенный метод случайной окклюзии оказался лучше, чем метод случайного стирания, в решении проблемы окклюзии и может дать лучшие результаты повторной идентификации.

Keywords: remote sensing image, image recognition, vehicle re-identification

Ключевые слова: изображение дистанционного зондирования, распознавание изображений, переидентификация автомобиля

1. Introduction

As an important object category in urban video surveillance, vehicles have attracted widespread attention in computer vision research fields such as detection, classification, and tracking. Among these research directions, vehicle re- identification is a relatively late but very important research topic. The task of Vehicle Re-ID is to search for images containing the same vehicle in the database given the detected vehicle image.Vehicle Re-Id can quickly discover, locate, and track the target vehicles in large-scale surveillance videos. So, it has pervasive applications in multiple fields, such as video surveillance, intelligent transportation and criminal Investigation. For computer vision tasks, occlusion has always been a difficult problem to solve. Vehicle can be occluded by some obstacles (e.g. street lamp, sign board, trees or other vehicles) or move out of the camera's field of view, resulting in information loss. Thus, it is necessary to match vehicle with occluded images, which is known as occluded vehicle Re-ID problem. The occluded Re-ID problem is more challenging due to the following two reasons: (1) Under occlusion, the vehicle images contain less discriminative information and is more likely to match incorrect vehicles. (2) It has been proven that matching parts based on their features is effective. But they require posture alignment, so they cannot

work well under severe occlusion. Recently, some vehicle Re-ID methods are proposed, most of them only consider better feature extraction. There are few studies on occluded Re-ID. Most of them only consider first-order information for feature learning and alignment such as the predefined regions or poses. They cannot solve the problem of missing information in the occluded images. In this paper, a network for vehicle re-identification is proposed that combined random occlusion. Compared with random erasure, the random occlusion method brings additional features to the covered rectangular area, rather than other simply filling.

In recent years, vehicle Re-Id is still on its early stage and some related work has been carried out.. Feris et al.[1]proposed a vehicle detection and retrieval system, in which vehicles are classified into different types and colors by appearance, then indexed and searched them in the database based on these attributes. Liu et al.[2]firstly evaluated and analyzed several appearance-based models, including the texture, color, and semantic attribute, then proposed a fusion model of low-level features and high-level semantic attributes for vehicle Re-Id. Due to the similarity of vehicles and various environmental factors such as lighting and viewpoints, it is difficult for appearance based methods to uniquely identify vehicles. More importantly, this situation is especially serious when there is occlusion in the image. Occluded Re-identification Given occluded probe images aims to find the same object appearance in dis-joint cameras. This task is more challenging because of incomplete information and spatial misalignment. Zhuo et al.[3] used occluded/non- occluded binary classification (OBC) loss to distinguish the occluded images from holistic ones. In their subsequent works, a saliency map is predicted to highlight the discriminative part, and a teacher-student learning scheme further improves the learned features. Miao et al.[4] gave a pose guided feature alignment method to match the local patches of probe and gallery images based on the human semantic key points. And they use a pre-defined threshold of key points

confidence to determine whether the part is occluded or not. Fan et al.[5] used a spatial channel parallelism network (SCPNet) to encode partial features to specific channels and fused the overall and part features to obtain discriminative features. Luo et al.[6] used a spatial transform module to transform the overall image, align it with the local image, and then calculate the distance between the alignment pairs.

2. Proposed method

2.1. Random occlusion

Zhong et al. proposed random erasure, which is a new data augmentation method for training convolutional neural networks [7]. In training, randomly erasing a rectangular area in a randomly selected image and erasing its pixels with random values. Random erasure is parameterless learning, easy to implement, and can be integrated with most CNN based recognition models.

Random occlusion is an improvement on random erasure. In training, randomly occlude two rectangular regions in the image and pixelize one rectangular region with the other. In this process, training images with different occlusion levels are generated, which reduces the risk of overfitting and makes the model robust to occlusion. Although simple, random erasure is a supplement to commonly used data augmentation techniques such as random cropping and flipping. Flow chart of random occlusion method is shown in the Fig. 1.

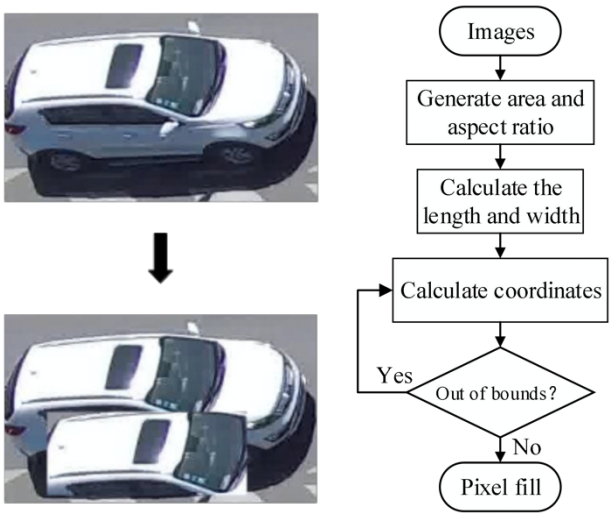


Figure 1 — Flow chart of random occlusion

Firstly, generate area and aspect ratio of the rectangle region. Secondly, calculate the length and width of the rectangle region. Thirdly, generate the location of two rectangle region and calculate whether exceed the image boundary. Finally, fill the pixel value of one rectangle region to the other rectangle region.

In training, random occlusion is carried out with a certain probability. For an image I in a mini-batch, its probability of experiencing random occlusion is p, and the probability of it being kept unchanged is 1-p. At the same time , training images with various levels of occlusion are generated.

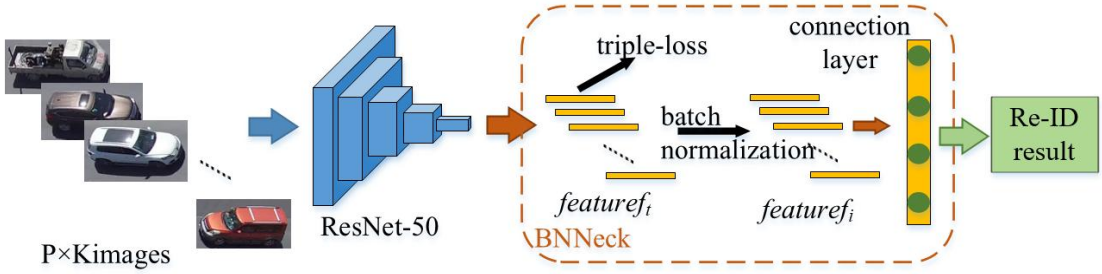


Figure 2 — Schematic diagram of re identification network structure

2.2. Re-identification Net

In the general re recognition network, there are P targets in each mini-batch and K images for each target. The images are extracted through the backbone network to obtain the global feature, and then use this feature to calculate the loss. On this basis, the network used in the proposed method adds several skills that can improve the accuracy of re recognition, such as preheating learning rate, label smoothing, last stride, bnneck [8] and center loss. The overall structure of the network is shown in Fig. 2.

3. Experiments

Two sets of experiments have been done. The RS images using for the experiments are shown in Fig. 3 and Fig.5 (a), whose sizes are 1200×878 and 931×711.

(1) Datasets

In this paper, we used the VARI vehicle data set [9]. VRAI datasets is used for vehicle re-identification research in aerial imagery. The task of vehicle Re-ID based UAV is typically more challenging than the counterpart based on fixed surveillance cameras, as vehicles in UAV-captured images are featured in larger pose variation and wider range of resolution. The VARI datasets is split to the training set and the testing set. The training set contains 66,113 images with 6,302 IDs, and the testing set contains 71,500 images with 6,720 IDs. The VARI vehicle data set is shown in the Fig. 3.



(a) Training set



(b) Testing set



(c) Query set

Figure 3 — VARI data set

(2) Re-identification result of simulated occlusion image

The query set is randomly erased by 0 value to simulate the situation of vehicle occlusion. The experimental data set is the same as that in the previous section, and four experiments are carried out. Among them, one is the control experiment without random erasure and random occlusion, one is the experiment with 0-value erasure, one is the experiment with random pixel erasure, and the last is the experiment with random occlusion. In the parameter settings of random erasure and random occlusion, the occlusion probability is set to 0.5, the occlusion area coefficient is 0.02 to 0.3, and the aspect ratio is 0.3 to 3. Random erasure and random occlusion images are shown in Fig. 4. Through the re-identification network for four times of training, they are the original data set, using two random erasure methods and using random occlusion method. Resnet-50 network is used as the backbone network in the training because of a good performance in the task of vehicle re-identification.The basic learning rate is 0.01, and the total number of learning iterations is 80. It is carried out twice in 40 iterations and 70 iterations respectively. The learning rate decreases, and the batch size is 48. The experimental results are shown in Table 1.

Table 1 — Experimental results of simulated occlusion images

DATA SET	**Rank-1**	**Rank-5**	*mAP*
Original data set	87.8%	91.3%	69.0%
0-value erasure	97.4%	98.0%	75.3%
random value erasure	95.7%	97.2%	75.8%
random occlusion	95.0%	96.6%	75.4%



(a) Erase image with 0 value



(b) Random value erase image



(c) Random occlusion image

Fig. 4 random erasure and random occlusion images

The experimental results of re-identification of simulated occlusion images showed the effectiveness of the random occlusion method. When trained with the original data set, the re-identification rates of rank-1, rank-5 and map were 87.8%, 91.3% and 69.0%, respectively. The results are improved by using three methods: random 0-value erasure, random value erasure and random occlusion. Among them, the re-identification effect of random 0-value erasure is the best, which may be because the simulated occluded images in the query set are also processed by this method, and the image similarity between them is high. The experimental results show that the random occlusion method proposed can effectively improve the re-identification effect in the presence of occlusion.

(3) Re-identification result of real occlusion image

In the last part, the experiment proved that the simulated occlusion image method proposed in this part can improve the accuracy of vehicle re-identification on the simulated occlusion data set. In this part, the experiment was carried out with the real occlusion image. In the experimental data set, the query set includes 735 IDs and 1240 images, and the test set is filtered according to the query set. Each image has occlusion, and some occlusion images are shown in Fig. 5.



(a) occlusion by Building



(b) occlusion by other vehicles



(c) occlusion by Labeling error



(d)Vegetation occlusion

Figure 5 — Occlusion images in different situations Table 2 Experimental results of real occlusion images

In the images of the query set, there are many occlusion situations, such as the occlusion of street lights and other buildings, the mutual occlusion between vehicles due to angle problems, the occlusion of vegetation and so on. In the case of mutual occlusion between buildings and vehicles, the occluded part has regular edges, while the vegetation occlusion is more complex and the edges are not regular. There is also a special case that the complete image of the vehicle is not obtained due to the problem of data annotation, which can also be regarded as an occlusion. Through the re-identification network for four times of training, they are the original data set, using two random erasure methods and using random occlusion method. Resnet50 network is used as the backbone network in the training. The basic learning rate is 0.01, and the total number of learning iterations is

80. It is carried out twice in 40 iterations and 70 iterations respectively. The learning rate decreases, and the batch size is 48. The experimental results are shown in Table 2.

Table 2 — Experimental results of real occlusion images

DATA SET	Rank-1	Rank-5	*mAP*
Original data set	94.8%	96.5%	90.2%
0-value erasure	96.2%	98.3%	91.7%
random value erasure	96.5%	98.8%	92.6%
random occlusion	97.0%	98.9%	92.9%

The experimental results of re-identification of real occlusion images showed the effectiveness of the random occlusion method. When trained with the original data set, the re-identification rates of rank-1, rank-5 and map were 94.8%, 96.5% and 90.2%, respectively. The results are improved by using three methods: random 0-value erasure, random value erasure and random occlusion. The re-identification rates of rank-1, rank-5 and map for random 0-value erasure were 96.2%, 98.3% and 91.7%, 96.5%, 98.8% and 92.6% respectively, and 97.0%, 98.9% and 92.9% respectively. Among them, the random occlusion method proposed in this part obtains the best re-identification effect, because compared with random erasure, the random occlusion method brings additional features to the covered rectangular area, rather than simply filling with 0-value pixels or random pixels. The experimental results show that the random occlusion method proposed can effectively improve the re-identification effect in the presence of occlusion. In the future, the research will focus on generalization ability improvement, more complex vehicle types and background types. And by optimizing the parameter settings, the re-identification method may result in further potential improvement.

4. Conclusion

This paper proposed a re-identification method to solve the occlusion in remote sensing image, which extracted the pixels in the random rectangular area of the image and covers them to other positions of the image. The feasibility of the proposed random occlusion method was proved by experiments on simulated occlusion images. And experiments on real occlusion image data sets showed that the proposed random occlusion method was better than the random erasure method in solving the occlusion problem, and can obtain better re-identification results.

REFERENCES

1. Feris R S, Siddiquie B, Petterson J, et al. Large-scale vehicle detection, indexing and search in urban surveillance videos[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2011, 14(1): 28-42.

2. Liu H Y, Tian Y H, Yang Y W, et al. Deep relative distance learning: Tell the difference between similar vehicles[C]. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016: 2167- 2175.

3. Zhuo J , Chen Z , Lai J , et al. Occluded Person Re-identification[J]. IEEE, 2018.

4. Miao J , Wu Y , Liu P , et al. Pose-Guided Feature Alignment for Occluded Person Re-Identification[C]// 2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). IEEE, 2019.

5. Fan X , Luo H , Zhang X , et al. SCPNet: Spatial-Channel Parallelism Network for Joint Holistic and Partial Person Re-Identification[J]. Springer, Cham, 2018.

6. Lou Y, Bai Y, Liu J, et al. Embedding Adversarial Learning for Vehicle Re-Identification[J].IEEE Transactions on Image Processing, 2019:1-1.

7. Zhong Z, Zheng L, Kang G, et al. Random erasing data augmentation[C]. Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. 2020, 34(07): 13001-13008.

8. He S, Luo H, Chen W, et al. Multi-domain learning and identity mining for vehicle re-identification[C]. Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops. 2020: 582- 583.

9. Wang P, Jiao B, Yang L, et al. Vehicle re-identification in aerial imagery: Dataset and approach[C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. 2019: 460-469.

УДК 004.942 DOI: 10.37816/eeste-2024-1-129-133

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕТРОВОГО РЕЖИМА ТЕРРИТОРИИ КРУПНЫХ ТЕХНОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ
NUMERICAL MODELING OF WIND REGIME IN THE TERRITORY OF LARGE TECHNOGENIC OBJECTS

Олег Иванович Седляров, Елена Сергеевна Бородина,
Тамара Евгеньевна Каданцева, Анна Вениаминовна Чугарова,
Дмитрий Николаевич Яровой, Бошра Али
Oleg I. Sedlyarov, Elena S. Borodina , Tamara E. Kadantseva, Anna V. Chugarova,
Dmitriy N. Yarovoy, Boshra Ali

Российский Государственный Университет им. А. Н. Косыгина
(Технологии. Дизайн. Искусство) Россия, Москва
The Kosygin State University of Russia, Russia, Moscow
(e-mail: sedlyarov-oi@rguk.ru)

Аннотация: Проведено численное моделирование ветрового режима в непосредственной близости от полигонов твердых коммунальных отходов. Проведен полный цикл моделирования с использование свободного программного обеспечения. На примере объекта простой геометрической формы рассчитаны характеристики воздушных потоков. Показано, что изменение характера движения воздушных потоков будет оказывать влияние на рассеивание загрязняющих веществ.

Abstract: Numerical modeling of the wind regime in the immediate vicinity of solid municipal waste landfills was carried out. A full cycle of modeling was carried out using free software. Using an example of an object of simple geometric shape, the characteristics of air flows were calculated. It is shown that changes in the nature of air flow will affect the dispersion of pollutants.

Ключевые слова: ветровой режим территории, полигоны твердых коммунальных отходов, негативное воздействие на окружающую среду, численное моделирование, свободное программное обеспечение

Keywords: wind regime of the territory, landfills of municipal solid waste, negative impact on the environment, numerical modeling, free software.

В Московской области ежегодно образуется порядка 9,5 млн. тонн отходов производства и потребления. До введения в эксплуатацию современных комплексов по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов, большая часть отходов напрямую размещалась на полигонах. При этом обязательные требования к устройству полигонов выполнены не были, зачастую размещение отходов происходило на отработанных карьерах, кроме того, в процессе эксплуатации природоохранные мероприятия зачастую также не выполнялись. На территории Московской области в настоящее время закрыто 39 полигонов.

Одной из характерных особенностей современных полигонов ТКО является то, что тело полигона может возвышаться над уровнем окружающей территории на десятки метров, достигая высоты 50-70 метров и более. Современные методы расчета, применяемые для оценки воздействия намечаемой хозяйственной или иной деятельности на качество атмосферного воздуха, предназначены для расчетов на ровной или слабопересеченной местности с перепадом высот не превышающем 50 м на 1 км, что не позволяет их использовать для расчетов.

Одним из наиболее существенных факторов, определяющим рассеивание загрязняющих веществ является ветровой режим территории, на которой расположены источники выбросов загрязняющих веществ. Под ветровым режимом понимают ветровые условия в определенной местности, особенности распределения и перемены скорости и

направления ветровых потоков, их ежегодные и ежедневный процесс, а также характеристики ветров разных течений и скоростей [1].

Климат Московской области [2] характеризуется как умеренно-континентальный с морозной, снежной зимой и влажным, относительно теплым летом и хорошо выраженными переходными сезонами. Он обусловлен положением области в центре Русской равнины. Область расположена в поясе господства континентального климата умеренных широт, в котором преобладают воздушные массы умеренных широт, трансформированные из морских воздушных масс умеренного и арктического поясов.

В связи с большой изменчивостью атмосферной циркуляции наблюдается непостоянство погоды, иногда довольно резкая ее смена. Зимой наибольшую устойчивость обнаруживают циклоны преимущественно северо-западного направления.

В теплое время года (май–август) большую повторяемость имеют циклоны южного направления (16–25%) и западного (около 15%).

Необходимо отметить, что особенности климата, прежде всего ветрового режима, небольших локальных территорий определяются особенностями близ расположенной местности, характер рельефа – защищенность от ветров различных направТлений, направление и высота склонов, характер растительности – лес, поле, водный объект, болото и другие.

Для оценки ветрового режима используются несколько различных походов. Так, например, в [3] для определения направления ветра на местности со сложной структурой рельефа можно использовать моделирование устойчивости массы или диагностического потока. При таком подходе воздушный поток “подгоняется” к особенностям рельефа путем минимальных изменений исходных показателей и сохранения постоянства массы. Поскольку этот подход дает быстрые результаты, он также может быть использован для расчета статистики ветра для участка местности, где невозможны наблюдения. Для этого используются геострофические статистические данные (например, данные из верхних слоев атмосферы, полученные с шаров-зондов).

Если все же необходимо рассматривать термальные ветровые системы более подробно, то следует воспользоваться так называемыми прогностическими моделями. В зависимости от величины и рельефа моделируемой местности можно применять гидростатический или даже более сложный негидростатический метод [4]. Модели этого типа требуют сложной компьютерной обработки, а также большого опыта в их применении.

Агентством по охране окружающей среды США для проведения расчетов, носящих нормативный характер, рекомендована методика ISC3ST [5, 6]. Эта модель является одной из наиболее универсальных моделей рассеивания, реализующих Гауссовскую модель. В Российской Федерации приказом Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 6 июня 2017 г. № 273 «Об утверждении методов расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух» методика ОНД-86 [7] признана неподлежащей к применению на территории Российской Федерации с 1 января 2018 г. Документом [8] установлен новый механизм расчета концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе. Следует отметить, что данный нормативно-правовой документ не внес принципиальных изменений в методы расчета рассеивания загрязняющих веществ.

В настоящее время для моделирования ветровых процессов широко используется современное программное обеспечение, предназначенное для решения задач вычислительной гидродинамики (computational fluid dynamics, CFD). Значительное число исследований выполнено с использованием современных коммерческих программных продуктов, характерной особенностью которых является высокая стоимость базового программного обеспечения и, как правило, необходимость дополнительных затрат для расчетов на многопроцессорных системах.

Целью настоящей статьи является представление результатов моделирования ветрового режима территории, непосредственно прилегающей с крупным техногенным

объектам, а именно к полигонам твердых коммунальных отходов (ТКО), с использованием свободного программного обеспечения.

В качестве объекта моделирования рассматривается полигон ТКО, представляющей собой усеченную пирамиду с основанием размерами 460 х 170 м и высотой 38 м. (рисунок 1). Наружные откосы на первой очереди выполнены заложением 1:2. Общая высота первой очереди полигона составляет 15 м. На второй очереди наружные откосы выполнены заложением 1:1, а теоретическая высота составляет 13 м. Наружные откосы третьей очереди выполнены заложением 1:1 и высотой 12м, которая перекрыта сверху слоем суглинка толщиной 1 м. Общая теоретическая высота полигона составляет 38 м, а его теоретическая вместимость составит 1 870 216 м^3 [9].

На основе схемы полигона ТКО была создана 3D модель тела полигона (рисунок 2) в формате STL (STereoLithography).

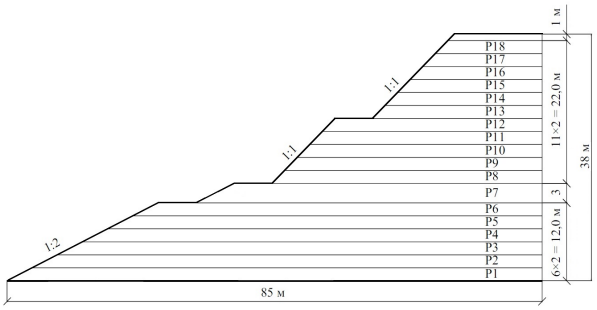


Рисунок 1 — Схема полигона ТКО (левая часть до оси симметрии) [9]

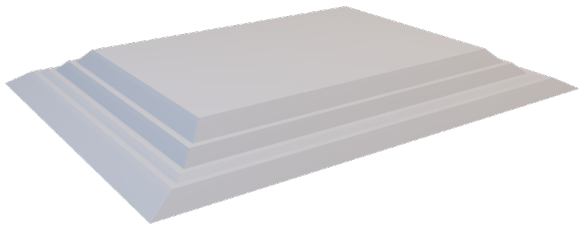


Рисунок 2 — 3D-модель тела полигона

Затем, с использованием утилиты snappyHexMesh (OpenFOAM), была создана конечно-объемная расчетная сетка (Mesh) для области течения вокруг модели полигона размерами 1460 х 750 х 300 м. Геометрический центр основания тела полигона совпадает с центом декартовой системы координат таким образом, что ось X совпадает с большей осью основания усеченной пирамиды, а ось Z направлена вертикально вверх. В качестве базовой сетки использовалась сетка с количеством ячеек 75 х 40 х 60 по осям X, Y, и Z, соответственно. В результате работы утилиты snappyHexMesh (OpenFOAM) общее количество расчетных ячеек составило чуть более 1,45 млн.

Для изучения ветрового режима территории (внешняя аэродинамика) решалась система нестационарных дифференциальных уравнений, включающая в себя уравнение состояния, уравнения сохранения массы и количества движения (импульса), уравнения переноса, определяемые соответствующими физическими моделями (например, моделями турбулентности и другими) с соответствующими начальными и граничными условиями, позволяющими однозначно определить условия задачи [10, 11].

В качестве модели турбулентности для предварительных расчетов использовалась модель *k-omega SST*. В качестве граничных условий для задания профиля ветра использовался метод The «Wall of Wind» [12] со скоростью 15 м/с по направлению оси X.

Для решения поставленной задачи был использован программный пакет OpenFOAM [13], представляющий собой свободно распространяемый инструментарий, предназначенный для решения задач вычислительной гидродинамики.

В заключении исследований был проведен анализ результатов расчетов. Современное программное обеспечение позволяет не только оценить численные результаты расчетов, но провести их обработку и визуализацию.

Как показал проведенный анализ, крупный техногенный объект, каким является полигон ТБО, оказывает значительное влияние на параметры ветрового режима в непосредственной близости от своей территории.

На рисунке 3 представлены профили X-составляющей скорости воздушного потока на различных расстояниях от тела полигона, чтобы оценить его влияние на характер течения.

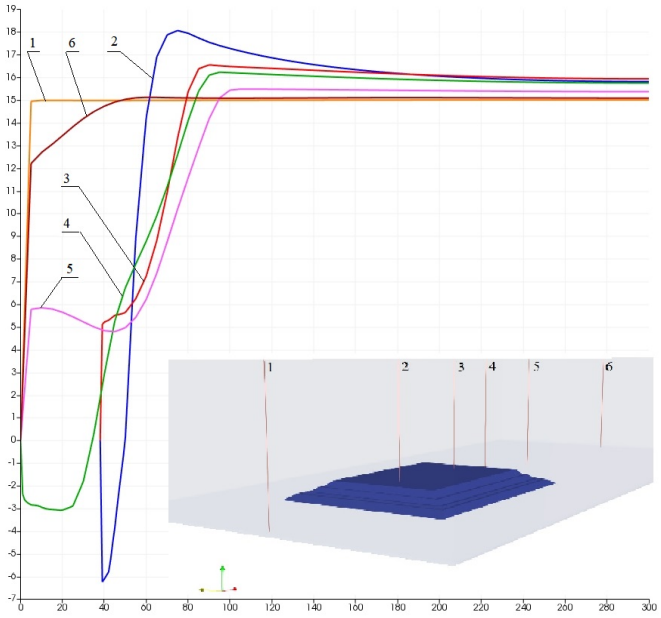


Рисунок 3 — Профили X-составляющей скорости воздушного потока
1 — X=-450 м; 2 — X=-100 м; 3 — X=100 м; 4 — X=235 м; 5 — X=450 м; 6 — X=950 м

Предварительные расчеты показывают, что профили скорости претерпевают существенные изменения, включая образование зон возвратных течений как непосредственно в передней, относительно набегающего воздушного потока, части полигона (кривая 2 рисунок 3), так и в его задней части (кривая 4, рисунок 3). Также на рисунке 3 наглядно видно, что на вертикальные профили X-составляющей скорости набегающего воздушного потока тело полигона высотой 38 м оказывает влияние, искажая начальный профиль набегающего потока примерно до высоты 100 м.

На рисунке 4 представлен вертикальный разрез поля X-составляющей скорости течения (плоскостью XoZ при Y=0). Визуализация поля течения, представленная на рисунке 4, позволяет оценить размеры и расположение зон возвратных течений.

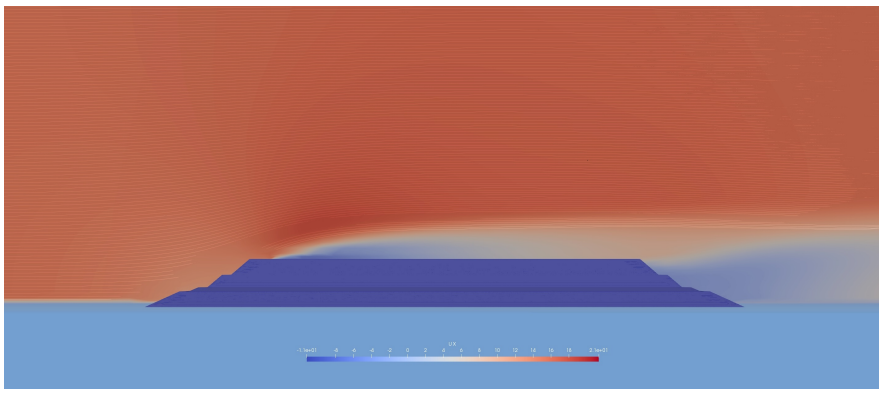


Рисунок 4 — Вертикальный разрез поля X-составляющей скорости течения

Представленный в работе подход к исследованию влияния крупных техногенных объектов на ветровой режим территории с использованием свободного программного обеспечения показал, что подобные объекты оказывают значительное влияние на ветровой режим, что в свою очередь будет сказываться на характере распространения (рассеивания) загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы и, соответственно, требует учета. Моделирование позволяет еще на стадии проектирования изучить процессы, происходящие в

непосредственной близости от подобных объектов, оценить возможные негативные последствия, а также наметить возможные пути решения и оценить эффективность каждого из них.

Задачами дальнейших исследований является моделирование ветрового режима для существующих полигонов ТКО, имеющих существенно более сложные формы тела полигона с использованием различных граничных условий для профиля скорости ветра.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кравченко М.И. Детровой режим и инсоляция городских территорий. Теория и практика современной науки, 2021. № 2(68). С. 110–121

2. Информационный сборник о состоянии окружающей природной среды Подмосковья в 2022 году / [Электронный ресурс] // Министерство экологии и природопользования Московской области : [сайт]. — URL: https://mep.mosreg.ru/dokumenty/informaciya-i-statistika/analiticheskie-doklady-i-obzory/23-08-2023-10-37-04-informatsionnyy-sbornik-o-sostoyanii-okruzhayushch (дата обращения: 31.01.2024).

3. Pielke, R. A. Mesoscale Meteorological Modeling / R. A. Pielke. – New York : Academic Press, 1984. – 612 p.

4. VDI Guideline 3945. Part 1. Environmental meteorology - Atmospheric dispersion models; Gaussian Puff Model . – Technical Division Environmental Meteorology. – 1996. – 36 p.

5. 272. User’s Guide for the Industrial Source Complex (ISC3) Dispersion Models, Volume 1 User Instructions : Volume 1. – Environmental Protection Agency, 1995. – 391 p.

6. 273. User’s Guide for the Industrial Source Complex (ISC3) Dispersion Models, Volume 2 Description of Model Algorithms : Volume II. – Environmental Protection Agency, 1995. – 129 p.

7. Общесоюзный нормативный документ. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ содержащихся в выбросах предприятий (ОНД-86) : не подлежит применению: [утверждена Председателем Государственного комитета СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды 4 августа 1986 г. N 192 : дата введения 1987-01-01]. – Ленинград : Гидрометеоиздат, 1987. – 92 с.

8. Методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе: [утверждены приказом Минприроды России от 6 июня 2017 года N 273 : подлежат применению с 1 января 2018 года]. – Текст : электронный // Электронный фонд нормативно-технической и нормативно-правовой информации Консорциума «Кодекс» [сайт]. – URL: https://docs.cntd.ru/document/456074826 (дата обращения: 04.08.2020).

9. Офрихтер В.Г., Батракова Г.М., Слюсарь Н.Н. Моделирование напряженно-деформированного состояния полигона твердых коммунальных отходов // Вестник МГСУ. 2020. т. 15. вып. 6. с. 776–788. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.6.776-788

10. Численный алгоритм моделирования двухфазных течений с учетом сжимаемости, вязкости и массовых сил/ Крапошин М. В., Кухарский А. В., Корчагова В. Н., Шевелёв А. А. //Промышленные процессы и технологии. 2022. Т.2. No3(5). С.6–27.
DOI: 10.37816/2713-0789-2022-2-3(5)-6-27

11. Моделирование распространения загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы с учетом влияния застройки и рельефа местности / О. И. Седляров, Е. С. Бородина // Промышленные процессы и технологии. 2022. Т. 2. № 2(4). С. 8–25
DOI: 10.37816/2713-0789-2022-2-2(4)-8-25

12. Fire Dynamics Simulator (FDS) and Smokeview (SMV) : сайт. – Екатеринбург, 2007 –. – URL: http://fds.sitis.ru/ (дата обращения: 07.07.2021). – Текст : электронный.

13. The OpenFOAM Foundation: OpenFOAM: // [Электронный ресурс]. - URL: https://openfoam.org/

УДК 303.094.7 DOI: 10.37816/eeste-2024-1-134-138

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА ОБУВИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ANYLOGIC
SIMULATION OF THE SHOE MANUFACTURING PROCESS USING ANYLOGIC SOFTWARE

Елизавета Николаевна Гужавина, Олеся Викторовна Сироткина, Светлана Владимировна Шкурихина, Елена Сергеевна Бородина
Elizaveta N. Guzhavina, Olesya V. Sirotkina, Svetlana V. Shkurikhina, Elena S. Borodina

Российский Государственный Университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство) Россия, Москва
The Kosygin State University of Russia, Russia, Moscow
(e-mail: guzhavina-en@rguk.ru)

Аннотация: Данная работа посвящена оптимизации процесса производства обуви с использованием программного обеспечения AnyLogic. В современном мире производство обуви становится все более важным с учетом растущего спроса на данное изделие. Оптимизация производственных процессов помогает увеличить производительность, снизить затраты и повысить качество продукции. В работе рассматривается методика применения программного обеспечения AnyLogic для моделирования и оптимизации производственного процесса обуви. AnyLogic предоставляет возможности для создания комплексных моделей, учитывающих различные аспекты производства, включая логистику, расстановку оборудования, планирование производства и т. д. Использование программного обеспечения AnyLogic в процессе оптимизации производства обуви позволяет предприятиям рационально использовать ресурсы, повышать производительность и конкурентоспособность на рынке.

Abstract: This work is devoted to optimizing the shoe manufacturing process using AnyLogic software. In the modern world, shoe manufacturing is becoming increasingly important given the growing demand for this product. Optimizing production processes helps to increase productivity, reduce costs and improve product quality. The paper considers the methodology of using AnyLogic software for modeling and optimizing the shoe manufacturing process. AnyLogic provides opportunities to create complex models that take into account various aspects of production, including logistics, equipment placement, production planning, etc. Using AnyLogic software in the process of optimizing shoe production allows enterprises to use resources efficiently, increase productivity and competitiveness in the market.

Ключевые слова: производство обуви, имитационное моделирование, оптимизация процесса.

Keywords: shoe manufacturing, simulation modeling, process optimization.

Современная индустрия производства обуви сталкивается с постоянно растущими требованиями к эффективности производственных процессов, качеству продукции и управлению ресурсами. Оптимизация производства становится ключевым фактором для успешной деятельности предприятий обувной отрасли. В этом контексте использование программного обеспечения для моделирования и оптимизации производственных процессов становится необходимым инструментом для повышения эффективности производства. AnyLogic представляет собой мощный инструмент для создания комплексных моделей, которые могут учитывать различные аспекты производственного процесса, включая логистику, технологические операции, распределение ресурсов и управление персоналом. [1]

Рассмотрим, из каких участок состоит процесс производства обуви.

Производственные участки обычно подразделяются на основные и подготовительные. К основным относятся участки по сборке заготовок и обуви, к подготовительным – раскройный, колодочный, стелечный.

На участке сборки заготовок производится сборка заготовок верха обуви с помощью ниток или других крепителей. Участок сборки обуви осуществляет сборку обуви, то есть скрепление деталей низа с заготовкой верха и окончательную отделку обуви. Участок состоит из двух потоков, один специализируется на индивидуальных заказах, второй на массовом выпуске продукции. Каждый из потоков имеет обтяжно-затяжный, подошво-прикрепительный и отделочный участки.

На обтяжно-затяжном участке подготавливаются колодки и заготовки к формованию и осуществляется собственно формование заготовки, то есть придание и закрепление пространственной формы заготовки. На массовочном потоке все операции выполняются механизировано, используются формованные стелечные узлы, затяжные машины марки Cerim (Италия) для затяжки носочно-пучковой и пяточно-геленочной части. На потоке сборки индивидуальной обуви большинство операций выполняется вручную, используется гвоздевая затяжка и ручная сборка стелечного узла.

На подошво-прикрепительном участке осуществляется подготовка следа затянутых заготовок к прикреплению низа и прикрепление подошв и каблуков. На массовом потоке используются формованные подошвы, тогда как на потоке индивидуальной обуви подошва собирается из плоских листовых материалов и обрабатывается после прикрепления к следу обуви.

На отделочном участке выполняется заключительная часть технологического процесса, связанная с окончательной отделкой обуви и приданием ей товарного внешнего вида. Подготовительные участки обеспечивают ритмичную и четкую работу всех заготовочных и сборочных цехов обувного производства. Раскройный участок осуществляет раскрой материалов на детали верха обуви и обработку выкроенных деталей. Раскрой осуществляется различными методами: вручную раскройным ножом (сложные индивидуальные заказы), на вырубочных прессах (массовка) а также используется автоматизированный раскройный комплекс фирмы Comelz (Италия).

На колодочном участке осуществляется изготовление индивидуальных колодок, а также изготовление и доработка образцов колодок для внедрения в производство новых моделей. Изготовление колодок осуществляется как традиционно – вручную, так и на современном цифровом оборудовании фирмы TRL (Германия) осуществляющем оцифровку и вытачивание колодок. [2]

Обувь - это товар, который производится по конвейерной системе. В работе рассматривается процесс моделирования и балансировки сборочной линии производства обуви. Рассмотрим процесс моделирования двух сборочных линий: линии сшивания и линии склейки.[3]

Для создания имитационной модели необходимо сформировать параметры управления. Для разработки имитационной модели производства обуви были получены следующие данные:

1. общее количество операций;
2. время обработки каждой операций;
3. приоритеты между процессами;
4. частота прибытия объектов или время между прибытием каждой сборочной линии;
5. уровень укомплектования персоналом для каждой задачи;
6. длина и скорость конвейера;
7. рабочие часы;
8. производственная мощность;
9. уровень брака (переделки).

Входные данные могут быть получены либо из архивных записей, либо собраны в режиме реального времени. Сбор исходных данных часто является наиболее сложным процессом при проведении имитационного моделирования и анализа. Первоначально сбор данных начинается с выявления и наблюдения за различными операциями, выполняемыми на каждой сборочной линии. После наблюдения за всеми операциями или задачами, которые

выполняются на сборочных линиях; определяются индивидуальные рабочие элементы для каждого рабочего места. Индивидуальный рабочий элемент - это минимально рациональный рабочий элемент, имеющий конкретную ограниченную цель.

Создание модели начинается с определения базовых объектов, местоположения рабочих станций, создания сети взаимодействия и определение ресурсов.

Сшивающая сборочная линия начинается со станции маркировки, на которой различные компоненты верхней части обуви маркируются для сшивания. Рядом с этой станцией компоненты транспортируются на шлифовку, на которой обрабатывается отмеченная деталь. Затем рабочая часть транспортируется по движущемуся конвейеру к следующей станции, где выполняется следующая задача. Таким образом, в зависимости от приоритета задач рабочая часть проходит через все линейные станции, где выполняются различные намеченные задачи. Наконец, эта линия заканчивается последней рабочей станцией "ручного стежка", где рабочие вручную вышивают верхнюю часть. [5]

На рисунке 1 показана модель сшивающей сборочной линии.

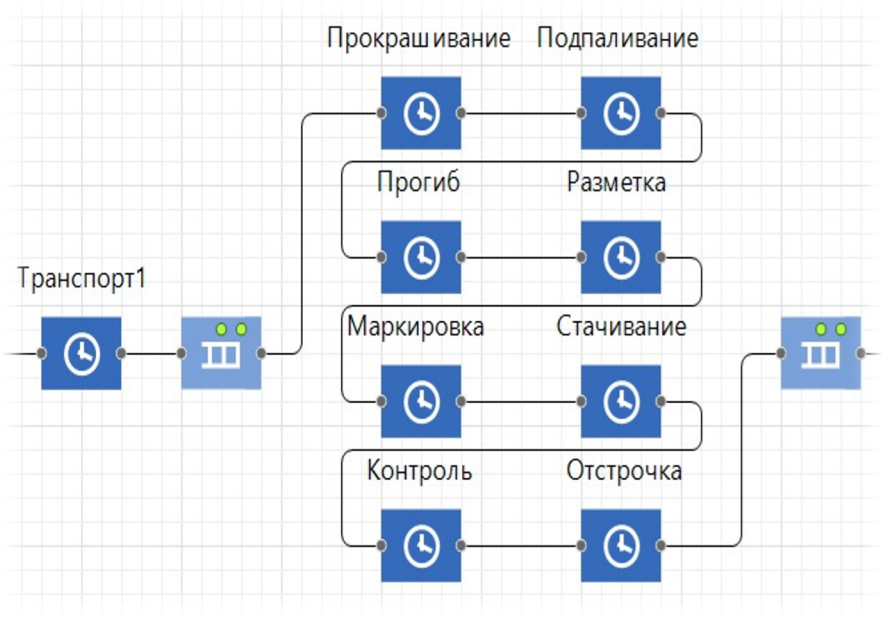


Рисунок 1 — Модель сшивающей сборочной линии, разработанная с помощью программного обеспечения AnyLogic

Эта сборочная линия начинается с операции прикрепления стельки, при которой внутренняя часть подошвы прикрепляется к основной подошве с помощью гвоздей или клея. Подобно линии сшивания, заготовка транспортируется от операции к операции в зависимости от технологической карты. Таким образом, заготовка проходит через все последовательные операции. Логика модели для клеевой сборочной линии также разрабатывается с использованием программного обеспечения AnyLogic и показана ниже на Рисунке 3.7.[6]

Сборочная линия склейки начинается с операции прикрепления стельки, при которой внутренняя часть подошвы прикрепляется к основной подошве с помощью гвоздей или клея. Подобно линии сшивания, заготовка транспортируется от операции к операции в зависимости от технологической карты. Таким образом, заготовка проходит через все последовательные операции. [5]

На рисунке 2 показана логика модели для клеевой сборочной линии.

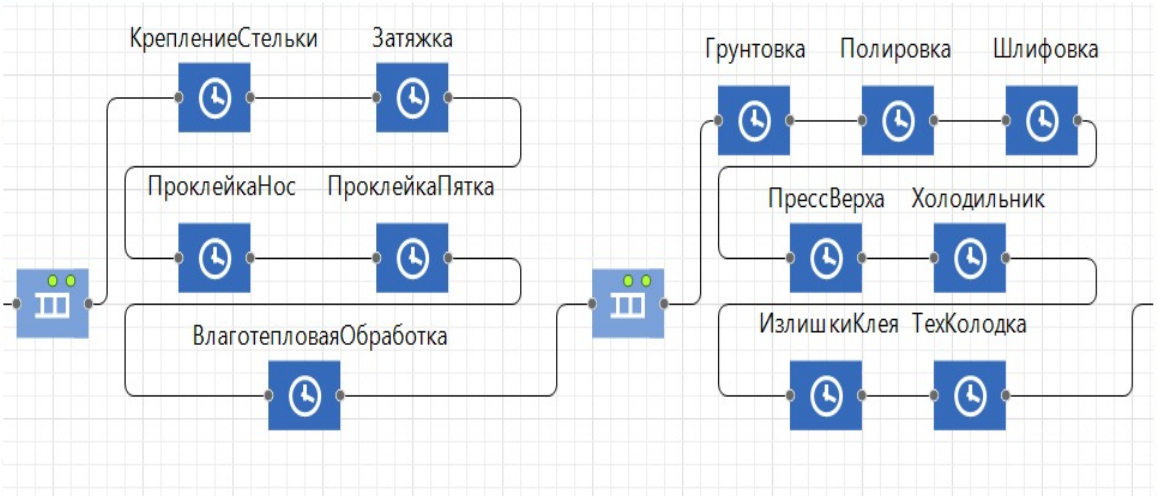


Рисунок 2 — Модель сборочной линии склейки, разработанная с помощью программного обеспечения AnyLogic

Модель показала, что наибольшую загрузку имеет секция сушки равную, тогда как операция влаготепловой обработки имеет самую низкую загрузку мощности.

Из приведенных выше рисунков для обеих сборочных линий мы можем ясно видеть, как варьируется использование мощностей. Это показывает, что объем работы обеих линий неравномерно распределяется между операциями. Другими словами, линии не сбалансированы. Это означает, что; из общего времени обслуживания, доступного на линии сшивания, 45,6% - это время простоя, которое теряется впустую.

Однако типичная эффективность хорошей балансировки линии в обрабатывающей промышленности колеблется от 0,90 до 0,95 [4, 5]. Следовательно, есть еще возможности для повышения эффективности обеих линий. Очевидно, что выход швейной линии - это вход для клеевой сборочной линии. Однако в реальной производственной системе наблюдается, что производительность сшивающей сборочной линии выше, чем клеевой сборочной линии. Это явление также наблюдается при анализе имитационной модели, в которой производительность сшивающей сборочной линии больше, чем производительность клеевой сборочной линии. Получается, что выход на двух сборочных линиях не сбалансирован. В результате между этими двумя операциями накапливается незавершенная работа разных моделей обуви каждого последующего дня. Это скопление незавершенного производства между двумя линиями затрудняет планирование всей производственной системы. В дополнение к этому, он занимает много места, увеличивает капитал и иногда становится трудно сопоставить разные модели, что создает дополнительную операцию разбора, увеличивающие затраты. Для решения этой проблемы необходимо найти решение, которое, по крайней мере, минимизирует разрыв между производственными объемами двух сборочных линий.

Рассмотрим различные альтернативные сценарии:

1. Предотвращение ненужного дублирования ресурсов со станции с низким использованием мощности

Некоторые станции имеют несколько ресурсов, но их загрузка ниже 50%. На этих станциях существует ненужное дублирование ресурсов. Следовательно, эти ненужные ресурсы дублирования должны быть вычтены из строки.

2. Объединение аналогичных операций с низким использованием ресурсов вместе и назначение одному работнику

Некоторые станции с аналогичными и последовательными операциями имеют низкую загрузку мощности. Однако эти операции можно объединить и назначить только одному исполнителю.

3. Повышение уровня ресурса на станциях с узким горлышком, но с высоким НЗП (Незавершенное производство)

Этот сценарий связан с изменением уровня ресурсов на станциях с более высоким уровнем.

4. Изменение метода работы

На линии непрерывной сборки после 2-й операции склеивания верха дают возможность приклеенной верхней части перед ее прикреплением к внешней подошве условно высохнуть на конвейере. Этот метод требует длинного конвейера и большего времени для достижения необходимого состояния. Однако, если мы установим сушильную машину вместимостью 16 башмаков, длина конвейера сократится на 13,60 м, а время, необходимое для этой операции, может быть уменьшено с 1138 секунд до примерно 420 секунд.

5. Комбинация всех вышеперечисленных сценариев

Выводы

Программное обеспечение AnyLogic представляет собой эффективный инструмент для моделирования и оптимизации производственных процессов в обувной индустрии. Его гибкость и многофункциональность позволяют учитывать различные аспекты производства, что позволяет компаниям создавать точные и полезные модели производственных процессов. Применение AnyLogic позволяет выявлять узкие места в производственных процессах и разрабатывать эффективные стратегии для их устранения. Анализ моделей производственных процессов с использованием AnyLogic позволяет оптимизировать использование ресурсов, сократить время производства и снизить затраты. Внедрение программного обеспечения AnyLogic в производственные процессы обувной отрасли может значительно повысить эффективность производства и улучшить конкурентоспособность предприятий. Это обеспечивает компаниям возможность оперативно реагировать на изменения в рыночных условиях и улучшать качество своей продукции.

Таким образом, использование программного обеспечения AnyLogic в процессе оптимизации производства обуви представляет собой эффективный подход для увеличения производительности и конкурентоспособности компаний в данной отрасли. Развитие и применение новых технологий в обувной индустрии способствует созданию более эффективных и устойчивых производственных процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Имитационное моделирование систем в среде AnyLogic: учебно-методическое пособие / М. В. Киселёва. Екатеринбург: УГТУ - УПИ, 2009. 88 с.

2. Никитина Л.Л., Глухова Н.А. «Конструирование изделий из кожи: методические указания к курсовому проекту»-Казань: Изд-во КГТУ, 2017

3. Отраслевые нормативы времени на операции сборки заготовок обуви механического производства пошиваемой на отечественном и импортном оборудовании // М.: ЦНИИТЭИлегпром, 1989. 154 с.

4. Отраслевые типовые нормы времени (выработки) на операции закройного обувного производства// М.: ЦНИИТЭИлегпром, 1973. 101 с.

5. Грундиг К.Г. Проектирование промышленных предприятий: принципы, методы, практика: М.: Альпина Бизнес Букс, 200.7 340 с.

6. Andrei Borshchev, Ilya Grigoryev. The Big Book of Simulation Modeling. Multimethod Modeling with AnyLogic 8, 2013. 612 с.

OCEAN DECIMETER-LEVEL REAL-TIME BDS PRECISE POINT POSITIONING BASED ON SHORT MESSAGE COMMUNICATION
ТОЧНОЕ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ ТОЧКИ ОКЕАНА BDS В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ НА ДЕЦИМЕТРОВОМ УРОВНЕ ОКЕАНА НА ОСНОВЕ СВЯЗИ КОРОТКИМИ СООБЩЕНИЯМИ

Fuxin Yang, Guochao Li, Jie Zhang, Zhiguo Sun, Ruizhe Zhang, Lin Zhao

College of Intelligent Systems Science and Engineering, Harbin Engineering University, China, Harbin
(email: yangfuxin@hrbeu.edu.cn)

Abstract: Decimeter-level positioning accuracy is the premise for most ocean applications, such as ocean development and ocean engineering construction. Although the existing real-time Precise Point Positioning (PPP) method can achieve economical decimeter to centimeter level positioning accuracy based on Global Beidou Short Message Communication (GBSMC), they can only broadcast limited satellites for regional users. This is because the above method maintains minimum resolution of real-time precise satellite orbit and clock corrections using a single card GBSMC. We proposed an ocean decimeter-level real-time BDS PPP method based on dual-card GBSMC to implement global positioning service. First, the encoding ranges of real-time precise satellite orbit and clock corrections were redefined to reduce occupied digits based on 2-month data. Second, the resolution adjustment strategy for real-time precise satellite orbit and clock corrections at the service-end was proposed to broadcast 24 global BDS-3 Middle Earth Orbit (MEO) satellites based on dual-card GBSMC device. Last, aiming at the frequency limitation of GBSMC, the real-time correction method at the user-end was employed due to the change of equivalent distance within 1 minute was at the centimeter level. The proposed method was verified by 6 static stations around the world, and the average positioning accuracy was 0.089 m and 0.103 m in the horizontal and vertical directions, respectively. Meanwhile, compared with the original SSR scheme, the proposed method had a longer convergence time. Furthermore, the real-time kinematic ocean multi-users experiment with reference to XP service of Kongsberg DPS 132 receiver was carried out. The results showed that the positioning accuracy was 0.132 m and 0.217 m in the horizontal a vertical directions after converged.

Аннотация: Точность позиционирования на дециметровом уровне является предпосылкой большинства океанских технологий, таких как освоение океана и строительство океанотехники. Хотя существующий метод точного позиционирования точки (PPP) в реальном времени может обеспечить экономичную точность позиционирования на уровне от дециметра до сантиметра на основе глобальной системы передачи коротких сообщений Beidou (GBSMC), он может транслировать только ограниченное количество спутников для региональных пользователей. Это связано с тем, что описанный выше метод поддерживает минимальное разрешение точной орбиты спутника и поправок часов в реальном времени с использованием одной карты GBSMC. Мы предложили метод BDS PPP в реальном времени на дециметровом уровне океана, основанный на GBSMC с двумя картами, для реализации службы глобального позиционирования. Во-первых, были переопределены диапазоны кодирования точных спутниковых орбит и поправок часов в реальном времени, чтобы уменьшить количество занимаемых цифр на основе данных за 2 месяца. Во-вторых, была предложена стратегия регулировки разрешения для точной орбиты спутника в режиме реального времени и коррекции часов на стороне обслуживания для трансляции 24 глобальных спутников BDS-3 на Среднеземной орбите (MEO) на основе устройства GBSMC с двумя картами. Наконец, с целью ограничения частоты GBSMC, на стороне пользователя был использован метод коррекции в реальном времени, поскольку изменение эквивалентного расстояния в течение 1 минуты было на уровне сантиметра. Предложенный метод был проверен на 6 статических станциях по всему

миру, средняя точность позиционирования составила 0,089 м и 0,103 м в горизонтальном и вертикальном направлениях соответственно. При этом по сравнению с исходной схемой ССР предложенный метод имел большее время сходимости. Кроме того, был проведен многопользовательский кинематический эксперимент в океане в режиме реального времени со ссылкой на службу XP приемника Kongsberg DPS 132. Результаты показали, что точность позиционирования после сближения составила 0,132 м и 0,217 м в горизонтальном и вертикальном направлениях.

Keywords: Precise Point Positioning, GBSMC, Global positioning services, Ocean.

Ключевые слова: точное позиционирование точки; GBSMC, услуги глобального позиционирования, океан

Introduction

The high precision absolute position solution is the premise of ocean development and ocean engineering construction (Geng et al. 2010a). Meanwhile, the high precision position solution is also critical to offshore icebreakers, offshore cable, pipeline laying, and oil field development. The International Maritime Organization (IMO) specifies that the minimum positioning accuracy should be better than 1 meter in mentioned ocean applications (IMO 2002). Therefore, the position solution of decimeter-level accuracy is widely concerned by commercial companies. Real-time high-precision positioning is a main application of Global Navigation Satellite System (GNSS) techniques. Although Real-Time Kinematic (RTK) can achieve centimeter level positioning accuracy, it is difficult to apply without nearby reference stations (Li et al. 2019). As one of the GNSS precise positioning technologies, Precise Point Positioning (PPP) uses undifferenced observations at a single user station to obtain global decimeter to centimeter level positioning accuracy (Zumberge et al. 1997). Hence, it is normally recognized that PPP is free from the constraint of reference stations and can be a cost-effective solution for position determination in ocean applications (Yang et al. 2019a). Real-time precise satellite orbit and clock corrections are the keys to realize decimeter to even centimeter level PPP (Hadas et al. 2015; Zhang et al. 2018). Some commercial companies adopt Geostationary Orbit (GEO) satellite links to provide real-time precise satellite orbit and clock corrections, such as RTX of Trimble (Leandro et al. 2011), StarFix of Fugro (Tegedor et al. 2015) and StarFire of NavCom (Dai et al. 2016). The high costs in such PPP service may scare individual GNSS users away. The real-time precise satellite orbit and clock corrections based on Satellite-Based Augmentation System (SBAS) are in free, such as the Wide Area Augmentation System (WAAS) and European Geostationary Navigation Overlay Service (EGONOS). The SBAS-aid PPP can achieve decimeter-level positioning accuracy (Li et al. 2016). However, the SBAS-aid PPP can only be provided for their own country and surrounding region. In addition, the real-time decimeter to centimeter level global ocean positioning service mainly depends on GPS.

Currently, the global BDS navigation satellite system (BDS-3) has completed global networking, which can provide global positioning, navigation, timing, global BDS short message communication (GBSMC), international search and rescue services (CSNO 2019; Yang et al. 2019b). For BDS systems, it can achieve ocean decimeter-level positioning accuracy based on the real-time precise satellite clock and orbit corrections in the Asia-Pacific region. The precise satellite clock and orbit corrections are broadcast in the format of Radio Technology Committee for Maritime Service (RTCM) (Yang et al. 2019a). Moreover, BDS-3 can broadcast real-time precise satellite orbit and clock corrections using B2b signal. The decimeter-level positioning accuracy can only be achieved for the users in China and its surrounding areas (Tao et al. 2021; Zhang et al. 2022). Regional Beidou-2 Short Message Communication (RBSMC-2) can only provide regional communication service with a bandwidth of 628 bits and a communication frequency of 1 min in the Asia-Pacific region. Although BDS-3 also provides regional short message communication service for the Asian-Pacific region with larger communication capacity (14000 bits) and faster communication frequency (30 s interval), the communication capacity of BDS-3 regional SMC cannot serve for global users. However, GBSMC is an economical and global communication service. GBSMC’s communication frequency is 1 min and maximum bandwidth is 560 bits. Therefore,

GBSMC cannot broadcast global GNSS or even BDS real-time precise satellite orbit and clock corrections based on RTCM State Space Representation (SSR) format (Nie et al. 2020).

In order to meet the requirements of broadcasting real-time precise satellite orbit and clock corrections based on GBSMC, the encoding methods of broadcasting the equivalent distance and broadcasting the compressed SSR data are both proposed. The equivalent distance encoding method derived Observation Space Representation (OSR) corrections between the satellite and the station based on real-time precise satellite orbit and clock corrections and user's approximate location. During the coding process, the total digits of derived equivalent distance are much smaller than that of independent real-time precise satellite orbit and clock corrections. Nie et al. (2020) proposed an equivalent distance and equivalent distance rate encoding method, and the centimeter level accuracy can be obtained based on 15 satellites with a single card RBSMC. Geng et al. (2022a) adopted equivalent distance encoding strategy based on 22 satellites in a single card GBSMC, and linear interpolation is adopted at the user-end based on the adjacent equivalent distance value to achieve centimeter level positioning accuracy. However, the mentioned method is not applicable to global multi-users and exposes privacy because the equivalent distance is derived from user's approximate location.

The compression encoding method removes unnecessary information and reduces digits of independent satellite orbit and clock corrections, which is benefit from the fact that the server does not need to know user's location. He et al. (2020) proposed an undifferenced and epoch-differenced encoding method for real-time precise satellite orbit and clock corrections, the decimeter-level positioning accuracy can be obtained. However, once the undifferenced corrections are lost, the real-time precise satellite orbit and clock corrections cannot be recovered. Although Geng et al. (2022b) initially adopted self-generated SSR and achieved decimeter-level positioning based on GBSMC, the method of satellite selection based on bidirectional communication cannot serve global multi-users at the same time. Yang et al. (2021) adjusted the resolutions of real-time precise satellite orbit and clock corrections and broadcasted 14 satellites' corrections based on 12 cards GBSMC, and the broadcast frequency is 10 seconds. However, the determination of resolutions and transmission intervals were not well discussed.

In order to achieve decimeter-level positioning accuracy for global ocean applications, an advanced compression encoding method is adopted to broadcast 24 BDS-3 MEO satellites' real-time precise satellite orbit and clock corrections based on dual-card GBSMC. First, the mathematical model of real-time PPP and various methods of processing errors are introduced. Subsequently,theproposedencodingmethodis introduced in detail. Especially, the redefined encoding range of real-time precise satellite orbit and clock corrections, the resolution adjustment scheme, and the variation of equivalent distance within 1 min latency are well discussed. Furthermore, the effectiveness of the proposed method is verified by 6 static stations around the world and the performance is further evaluated using real ocean data. Finally, the conclusions are given.

Real-time PPP model

A dual-frequency ionosphere-free (IF) combination model is adopted to eliminate first order term of ionospheric delay. The IF pseudorange and carrier phase measurements can be written as (Zumberge et al. 1997),

$$\begin{aligned} P_{IF}^{s} &= \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} P_1^S - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} P_2^S \\ &= \rho_r^s + (\delta t_r + d_r) - (\delta t^s + d^s) + \delta o_{orb} + T_r^s + \varepsilon(P_{IF}^s) \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned} L_{IF}^{s} &= \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} L_1^S - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} L_2^S \\ &= \rho^s + (\delta t_r + b_r) - (\delta t^s + b^s) + \lambda_{IF} N_{IF}^s + T_r^s + \delta o_{orb} + \varepsilon(L_{IF}^s) \end{aligned} \tag{2}$$

where, P_{IF}^{s}, L_{IF}^{s} are the IF pseudorange and carrier phase measurements in meters, respectively. The superscript s stands for satellite pseudo random noise code, ρ_r^s is the geometric distance of antenna phase center between the satellite s and the receiver r in meters. f_1 and f_2 represent B1I and B3I frequencies for BDS, respectively. δt_r is the receiver clock error, and δt^s is the satellite clock error in meters. d_r and d^s represent receiver and satellite pseudorange hardware delay bias in meters, respectively. b_r and b^s denote the hardware delay bias of carrier phase at receiver and satellite in meters, respectively. T_r^s is the tropospheric delay error in meters. δo_{orb} is the satellite orbit error in meters. λ_{IF} is the IF combination wavelength, measured in meters per cycle. N_{IF}^{s} is the IF combination ambiguity in cycle. $\varepsilon(P_{IF}^{s})$ and $\varepsilon(L_{IF}^{s})$ are receiver noise and multipath noise for pseudorange and carrier phase measurements in meters, respectively. In addition, the errors which are not mentioned in the observation model are corrected by empirical model, such as relativistic effect (Ashby 2003), phase wind up (Wu et al. 1993), tidal displacement and earth rotation (Kouba 2009).

The corrections of precise satellite orbit and clock are crucial to achieve real-time PPP. The real-time precise satellite orbit and clock corrections in RTCM-SSR format are used to correct broadcast ephemeris to obtain precise satellite orbit and clock error (IGS 2020). Real-time precise satellite orbit and clock corrections can be obtained from

$$\delta O(t) = \begin{bmatrix} \delta O_r \\ \delta O_a \\ \delta O_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta \dot{O}_r \\ \delta \dot{O}_a \\ \delta \dot{O}_c \end{bmatrix} (t - t_0) \tag{3}$$

$$\delta x = [\frac{\dot{r}}{|\dot{r}|} \times \frac{r \times \dot{r}}{|r \times \dot{r}|}, \frac{\dot{r}}{|\dot{r}|}, \frac{r \times \dot{r}}{|r \times \dot{r}|}] \delta O \tag{4}$$

$$\delta C(t) = C_0 + C_1(t - t_0) + C_2(t - t_0)^2 \tag{5}$$

The precise clock error dt_p^s and the precise orbit x_{prec}^s can be obtained from

$$dt_p^s = dt_b^s + \frac{\delta C}{c} \tag{6}$$

$$x_{prec}^s = x_{brdc}^s - \delta x \tag{7}$$

where, δO represents the satellite orbit correction vector in the orbital frame, δCrepresents the satellite clock correction. δO_r ,δO_a and δO_c represent the radial, along-track and cross-track correction parameters, respectively. $\dot{\delta} O_r$, $\dot{\delta} O_a$ and $\dot{\delta} O_c$ represent the rate of radial, along-track and cross-track corrections, respectively. r and $\dot{r}$ are the satellite orbit position vectors and velocity vectors in the earth-center-earth-fixed (ECEF) frame, which can be calculated from broadcast ephemeris. The satellite orbit correction δx in the ECEF frame can be calculated from (4). C_0 , C_1 and C_2 represent the polynomial coefficients of satellite clock corrections. x_{brdc}^s and dt_b^s represent the satellite orbit and clock error calculated by broadcas ephemeris, respectively. t0 is the reference time of SSR message information.

Since the real-time precise satellite orbit and clock corrections are generated in B1I and B3I frequencies, the pseudorange hardware delay bias of satellite and receiver can respectively be absorbed by the satellite clock error and the receiver clock error (Geng et al. 2022a). Carrier phase hardware delay error will be absorbed into the ambiguity (Geng et al. 2010b). In addition, the tropospheric dry hydrostatic part will be corrected through Saastamoinen model (Saastamoinen 1972). Therefore, the position parameters, receiver clock error, tropospheric zenith wet delay and IF ambiguities are all estimated as the unknown parameters.

Methodology

This section will describe the encoding format of a GBSMC. It firstly determines the encoding ranges, followed by the resolution adjustment schemes. Then, the latencyaccuracy of real-time precise satellite orbit and clock corrections within 1 minute was analyzed. Encoding format

In order to determine the encoding scheme of 24 BDS-3 MEO satellites based on dual-card GBSMC to achieve global decimeter-level positioning accuracy, the encoding format should firstly be determined. The designed GBSMC correction message consists of a header part, a body part and a 24-bits cyclic redundancy check (CRC). The header part consists of synchronize (SYN) code, epoch time, and the satellite identification (ID) mask. The SYN code marks the start of a packet with 8 bits. The epoch time is the reference time of the packet, which is determined by the seconds within an hour and ranges from 0 to 3599. The data space of epoch time is 12 bits, and the hourly time can be obtained from local time. The satellite ID mask indicates satellite number. Coding space of 24 bits was enough for satellite ID mask because only 24 BDS-3 MEO satellites are broadcast.

It is noted that since the value of orbit correction rate is general in the range of 10^{-4} meters to 10^{-5} meters, which has little effect on the orbit corrections within one minute, and the clock corrections parameters C_1 and C_2 are almost 0 (Yang et al. 2021). Therefore, the body part consists of the issue of data ephemeris (IODE), radial, along-track, 192 cross-track, and C_0 corrections for each satellite. The IODE is an integer value which indicates the issue number of a set of ephemeris parameters, and the IODE is used to match broadcast ephemeris and correction information (IGS 2020). The IODE value ranges from 0 to 235, and the digit of IODE is 8 bits. Fig. 1 shows the overall encoding format of BDS-3 MEO corrections. The digits of radial, along-track, cross-track, and C_0 corrections for each satellite will be determined next.

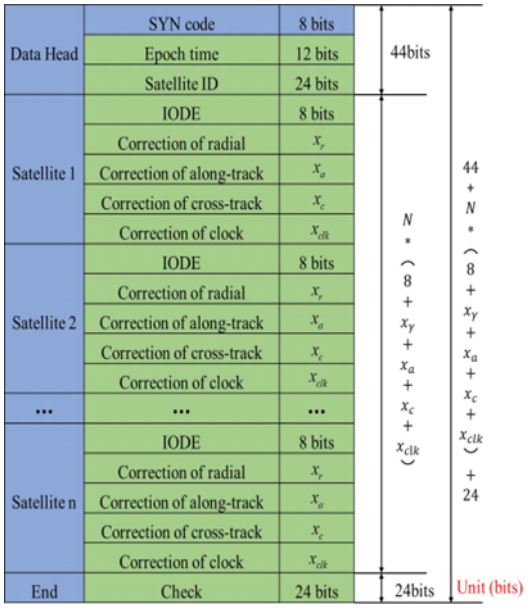


Figure 1 –The encoding format of BDS-3 MEO correction message. The first line of the blue panel represents the header, lines 2 through n of the blue panel represent the specific corrections, the last line represents the end of a correction message.

Numerical range analysis of SSR corrections

To reduce the occupied digits for the real-time precise satellite orbit and clock corrections and redefine the coding ranges, the numerical ranges of the BDS-3 MEO real-time precise orbit and clock corrections were analyzed. The SSRA00CAS0 mountpoint's BDS-3 MEO real-time precise orbit and clock corrections were adopted from Day of Year (DOY) 64- 125 in 2022. In order to broadcast the original corrections of mountpoint in the proposed coding scheme, the distribution ranges of real-time precise orbit and clock corrections for BDS-3 MEO satellites from SSRA00CAS0 mountpoint were counted without any pre-processing. Fig. 2 shows that the numerical distribution ranges of BDS-3 MEO real-time precise satellite orbit and clock corrections in SSR format, except

C19. The radial corrections are distributed between -1 m and 3 m. The numerical distribution ranges are both between -2 m and 2 m for cross-track and along-track corrections. The numerical distribution range of clock corrections is between -20 m and 60 m. Except for larger corrections without pre-processing in Fig. 2, the obvious systematic bias is because the broadcast orbits of BDS are referred to the APC of the B3 signal, whereas the precise orbits are referred to the APC of the B1I/B3I IF combination (Lv et al. 2019). Combined with the probability of numerical distribution in Table 1. The statistics results shows that the percentages of orbit corrections respectively are all 100% within ±3.5 m in the radial, along-track, and cross-track directions. Moreover, the percentage of clock correction is 100% within ±63.5 m.

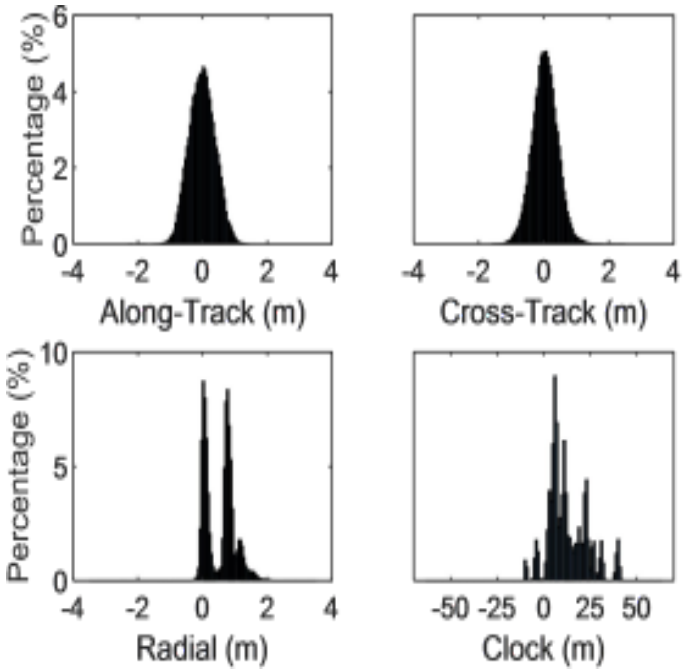


Figure 1 – SSR value range distribution of BDS-3 MEO satellites without C19.

Table 1 — Percentages statistics of the absolute value of the BDS-3 MEO satellites orbit and clock correction in SSR format without C19, the values are percentage.

Correction Type	<0.5 m	<1.5 m	<3.5 m	<7.5 m	<15.5 m	<31.5 m	<63.5 m
Radial	43.1	97.9	100	100	100	100	100
Along-Track	78.8	99.9	100	100	100	100	100
Cross-Track	81.5	99.9	100	100	100	100	100
Clock	0	0	8.7	38	65	94.7	100

The distribution ranges of real-time precise satellite orbit and clock corrections for C19 are different from other BDS-3 MEO satellites. The Table 2 shows the probability of numerical distribution for C19. The statistics results shows that the percentages of orbit correction respectively are 98.7%, 97.4%, and 96.8% within ±3.5 m in the radial, along-track, and cross-track directions. Meanwhile, the percentage of clock correction is 99.9% within ±63.5 m. In order to broadcast real-time precise orbit and clock corrections of 24 BDS-3 MEO satellites, the orbit correction range of each satellite is determined to be ±3.5 m, and the clock error correction range is determined to be ±63.5 m. In addition, when a satellite's corrections exceed the defined range, the satellite will be eliminated on the server-end.

Table 2 – Percentages statistics of the absolute value of C19 satellite orbit and clockcorrection in SSR format, the values are percentage.

Data Type	<0.5 m	<1.5 m	<3.5 m	<7.5 m	<15.5 m	<31.5 m	<63.5 m
Radial	1.94	95.4	98.7	100	100	100	100
Along-Track	73.9	96.8	97.4	98.3	98.9	99.8	100
Cross-Track	68.2	96.3	96.8	97.5	98.1	99.4	100
Clock	0.08	0.24	0.53	31.9	99.9	99.9	99.9

Determination of resolution

The resolution of real-time precise satellite orbit and clock corrections affect the accuracy of clock and orbit corrections and encoding space. Higher resolutions will result in higher clock and orbit correction accuracy, which also requires more encoding space.

The corrections of radial and clock errors dominate the ranging error between the satellite and the station, and the contribution factors to ranging error are 0.98, 0.14, 0.14 and 1 in the radial, along-track, cross-track and clock error, respectively (Montenbruck et al. 2015). For simplicity, the resolutions of clock error and radial corrections are set to be the same, and along-track and cross-track corrections are set to be the same. Therefore, the relationship between the encoding resolutions and the occupied digits for a satellite can be determined from

$$Y = Y_1 + Y_2, R_1 > R_2 \tag{8}$$

$$Y_1 = ceil(\log_2^{\frac{3.5}{R_1}}) + ceil(\log_2^{\frac{63.5}{R_1}}) \tag{9}$$

$$Y_2 = ceil(\log_2^{\frac{3.5}{Min(R_2)}}) + ceil(\log_2^{\frac{3.5}{Min(R_2)}}) \tag{10}$$

where, Y is the total number of digits occupied for a satellite's real-time precise orbit and clock corrections; $Y1$ and $R1$ are the digits and resolutions of the real-time precise satellite radial and clock corrections, respectively. *ceil* represents rounding up. Due to the corrections of radial and clock error dominate the ranging error between the satellite and the station, the argument R_1 should be firstly less than the resolution R_2 of the real-time precise satellite along-track and cross-track corrections. After the resolution R_1 is determined, the number of digits of radial and clock corrections can be uniquely determined by (9). According to (8), the remaining encoding space is the digits Y_2 occupied by the along-track and cross-track corrections. In order to maintain the maximum resolution in the determined digits space Y_2, the resolution R_2 for a satellite's real-time precise satellite along-track and cross-track corrections are taken to the minimum value in (10). It is worth stating that the smaller value of R1 and R2, the higher the resolution.

The effective range of radial, cross-track, along-track and clock error are all ±209.715 m in RTCM SSR format. The resolution of clock error and radial are both 0.1 mm, and the resolution of cross-track, along-track are both 0.4 mm (IGS 2020). Combined with the effective range and the resolution of orbit and clock corrections based on SSR format, it requires 92 bits encoding space for each satellite. The bandwidth of a GBSMC card is only 560 bits. Concerned that the coding space occupied by the data header and data tail is 68 bits in Fig. 1, only five satellites can be encoded in a GBSMC card. Therefore, five GBSMC cards are needed to broadcast 24 BDS-3 MEO satellites.

In order to balance the decimeter-level positioning accuracy and the number of GBSMC cards, the resolutions of original SSR need to be adjusted. If a single card GBSMC is used to broadcast real-time precise satellite orbit and clock corrections for 24 BDS-3 MEO satellites, 12 bits will be assigned to a satellite for encoding. In this case, when the resolutions of radial and

clock corrections are 1 m, the resolutions of the along-track and cross-track corrections are both 7 m according to the (8-10). According to the law of error propagation, the radial errors and clock errors will bring the error of 1 m between the satellite and the station (Montenbruck et al. 2015). The along-track and cross-track errors will bring error of 0.98 m between the satellite and the station. Therefore, it is difficult to achieve decimeter-level positioning accuracy. In the case of dual-card, each satellite has 41 available encoding bits excluding header and tail data. The determination process of encoding scheme for a satellite's clock and orbit corrections mainly includes the following processes: First, the clock and orbit corrections have been determined to ± 63.5 m and ± 3.5 m, respectively. Second, based on the theory that the influence factors of radial, along-track, cross-track errors and clock error on the ranging error are 0.98, 0.14, 0.14 and 1, the resolutions of radial and clock are determined to be consistent, and the resolutions of along-track and cross-track are same. Third, we designed different encoding schemes with a step size of 0.005 m for clock and radial. After the resolutions of radial and clock are determined, the number of digits of radial and clock corrections can be uniquely determined. Last, because the different resolution adjusting schemes will be generated in the same coding space, the four coding schemes can be determined according to (8-10), as shown in Table 3. It is worth noting that we focus on global decimeter-level positioning service, and the optimal resolution adjustment scheme is not discussed.

Table 3 – Resolution adjustment scheme for precise satellite orbit and clock corrections

Strategy	Radial		Cross-Track		Along-Track		Clock	
	Resolution (m)	Digit (bits)	Resolution (m)	Digit (bits)	Resolution (m)	Digit (bits)	Resolution (m)	Digit (bits)
Scheme 1	0.005	11	0.875	3	0.875	3	0.005	15
Scheme 2	0.010	10	0.450	4	0.450	4	0.010	14
Scheme 3	0.015	9	0.225	5	0.225	5	0.015	14
Scheme 4	0.030	8	0.125	6	0.125	6	0.030	13

In order to verify the positioning performance based on different resolution adjustment schemes, six stations distributed around the world are selected to carry out BDS real-time static PPP experiment, including MIZU, FAA1, UNBN, PARC, CPVG, MAR7. The experimental data is from DOY 64-70, in 2022. The sampling interval is 30 s, and the station coordinates provided by International GNSS Service (IGS) weekly Solution Independent Exchange Format (SINEX) solutions are used as the reference to evaluate positioning performance. The static PPP convergence time (CT) requires that the errors maintain within 0.2 m for 20 epochs in the horizontal direction (Geng et al. 2022a). The positioning error is the difference between the reference coordinate and thepositioning result. The reason is that IMO pays more attention to horizontal positioning accuracy. The positioning accuracy is the root mean square (RMS) of positioning error in the horizontal and vertical directions after convergence. The other processing strategy of static real-time PPP is shown in Table 6.

First, we take the station FAA1 as an example to display the positioning performance based on the above four different resolution schemes. In order to visually show the performance of different schemes, the three hours' time series of positioning errors are shown in Fig. 3 and Fig. 4. Meanwhile, the RMS based on four different resolution schemes are shown in Table 4. In terms of convergence time, scheme 1 had a longer convergence time than the others, and scheme 4 had the shortest convergence time.

The convergence time of scheme 1 was 137 min, and the convergence time of scheme 2, scheme 3 and scheme 4 were 49 min, 49 min and 43.5 min, respectively. After convergence, scheme 1 was significantly worse than the other three schemes in horizontal and vertical positioning

accuracy. The positioning accuracy of scheme 1 was 0.132 m, while that of the other three schemes were about 0.070 m in the horizontal direction. In terms of vertical accuracy, the positioning accuracy of scheme 1 was 0.024 m, while that of the other three schemes were about 0.01 m. Therefore, scheme 4 had relatively the shortest convergence time in achieving centimeter level positioning accuracy.

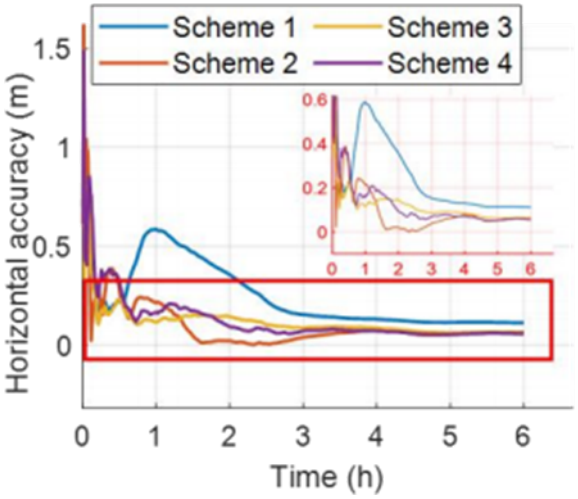


Figure 3 — Horizontal positioning results for FAA1.

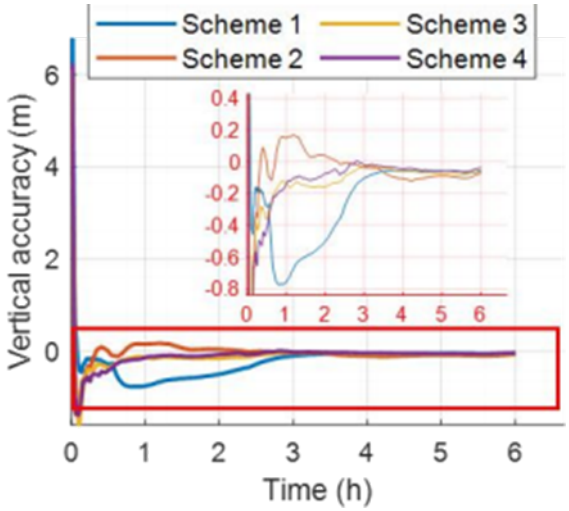


Figure 4 — Vertical positioning results for FAA1.

Table 4 – RMS statistics for FAA1 station.

Data	Scheme 1	Scheme 2	Scheme 3	Scheme 4
Horizontal accuracy (m)	0.132	0.070	0.069	0.070
Vertical accuracy (m)	0.238	0.123	0.073	0.079
Convergence time (min)	137	49	49	43.5

In order to fully demonstrate the positioning performance of the above four different resolution schemes, the positioning performances for 6 static stations based on 7-day observations were analyzed. The convergence time and horizontal accuracy arerepresented in the Fig. 5. The bar chart represents the horizontal positioning accuracy, and the curve represents the convergence time. The vertical accuracy is represented in Fig. 6. Scheme 1 was significantly worse than the other three schemes in the horizontal and vertical positioning accuracy and convergence time. The average positioning accuracy and average convergence time of different schemes are summarized in Table 5. For theschemes 2-4, the difference of positioning accuracy was all within 1cm in the horizontal and vertical directions. The average convergence time in schemes 1-4 were 137.00 min, 47.25 min, 34.75 min and 28.25 min, while scheme 4 had the fastest convergence time. The experimental results agree with the above theoretical calculations. Therefore, scheme 4 can be used as the encoding scheme with the shortest average convergence time.

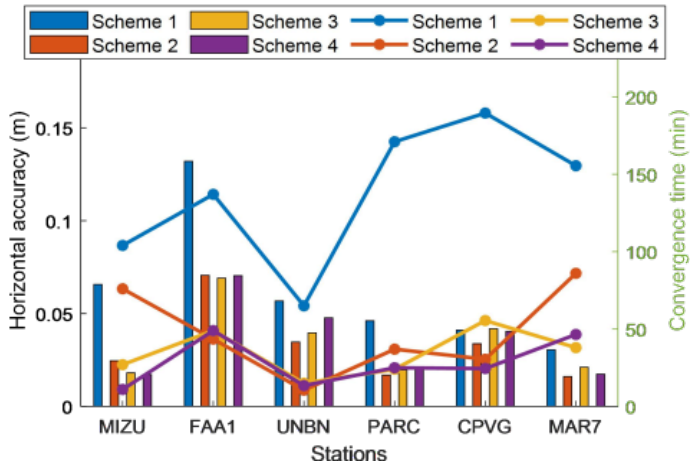


Figure 5 – Positioning accuracy and convergence time in the horizontal direction of 6 global stations.

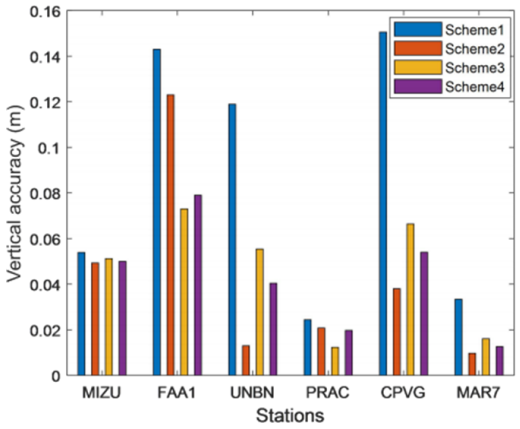


Figure 6 – Positioning accuracy in the vertical direction of 6 global stations.

Table 5 – Average RMS value statistics and convergence time for 6 stations

Type	Horizontal accuracy (m)	Vertical accuracy (m)	CT (min)
Scheme 1	0.070	0.067	137
Scheme 2	0.032	0.023	47.25
Scheme 3	0.034	0.034	34.75
Scheme 4	0.035	0.030	28.25

Real-time precise orbit and clock correction accuracy with minute-level latency.

The real-time precise satellite orbit and clock corrections latency determines the PPPservice capacity (Hadas et al. 2015). Considering the broadcasting frequency of GBSMC is 1 min, it is necessary to analyze the variation of SSR accuracy under 1 min latency. Since the orbit and clock independent latency can't express the change of ranging accuracy, we derive the equivalent distance based on real-time precise satellite orbit aclock corrections and the user's approximate location

$$\delta\rho_r^s = e \cdot \delta O - c \cdot \delta C \tag{11}$$

$$e = \frac{\tilde{x}_r - x_{prec}^s}{\left|\tilde{x}_r - x_{prec}^s\right|} \tag{12}$$

where c represents the speed of light in a vacuum, measured in meters per second. e represents the unit vector from the receiver antenna phase center to the satellite antennaphase center. The unit vector is calculated by the approximate position of the user r and the precise position of the satellite xp(s)rec, as shown in (7).

The real-time precise satellite orbit and clock corrections are projected to the vector direction between the satellite and the station. The real-time precise satellite orbit and clock corrections are collected from SSRA00CAS0 mountpoint from DOY 64 to 70, in 2022. To verify the influence of minute-level communication latency based on scheme 4, the latencies are set as 30 s, 60 s and 120 s respectively. Referring to equivalent distance derived without latency, the RMS of 24 BDS-3

MEO satellites' equivalent distance error without orbit correction rate under different latencies is shown in Fig. 7. It is worth noting that the bar charts are C19-C46 from left to right. It can be seen the maximum difference of equivalent distance was below 0.02 m while the latency was 2 min. Meanwhile, under the same latency, the RMS of equivalent distance error for all the BDS MEO satellites was basically the same. Within 1 min latency, the average error of equivalent distance was about 0.008 m. Under the millimeter-level errors between the satellite and the station, centimeter level positioning accuracy can be achieved by real-time PPP (Ji et al. 2022).Therefore, the millimeter-level error can be ignored, the real-time precise satellite orbit corrections can be directly calculated based on (3) and (4), and the real-time precise satellite clock corrections can be calculated based on (5) within 1 min latency.

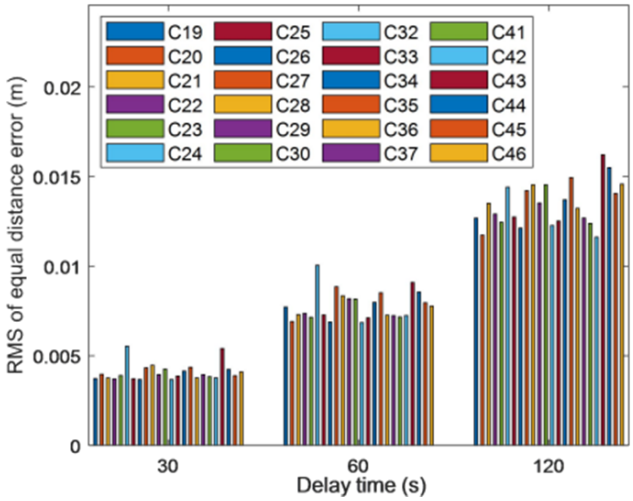


Figure 7 – Different latency accuracy of BDS-3 MEO satellites. The errors of twenty-four BDS-3 MEO satellites are counted with the latency from 30 seconds to 120 seconds.

In summary, in order to broadcast 24 BDS-3 MEO satellites' real-time precise satellite orbit and clock corrections to implement global decimeter-level positioning service without users' location and observed satellites. The flow chart of global BDS short message communication for global decimeter-level positioning service is shown in Fig. 8. The server-end obtained the real-time satellite orbit and clock corrections from the internet. The 24 BDS-3 MEO satellites orbit and clock corrections are recoded referring to the format of Fig. 1. The encoding ranges of real-time precise satellite orbit and clock corrections were separately redefined to ±3.5 m and ±63.5 m. And, the resolutions of real-time precise satellite radial, along-track, cross-track and clock corrections were adjusted as 0.030 m, 0.125 m, 0.125 m, 0.030 m to broadcast global 24 BDS-3 MEO satellites based on dual-card GBSMC command device. The command device uses dual-card broadcast global 24 BDS-3 MEO satellites orbit and clock corrections sequentially, and each card broadcasts the corrections of 12 satellites. In addition, the multi-cards GBSMC command machine can realize global multi-users operation. At the user-end, the multi-users based on a single card GBSMC device can receive 24 BDS-3 MEO real-time precise satellite orbit and clock corrections from a dual-card GBSMC command device. The receiving interval between two cards of server-end is in seconds. The real-time precise satellite orbit corrections were directly calculated based on (3) and (4), and the clock correction was calculated based on (5). Moreover, the real-time PPP solutions can be obtained with BDS observations.

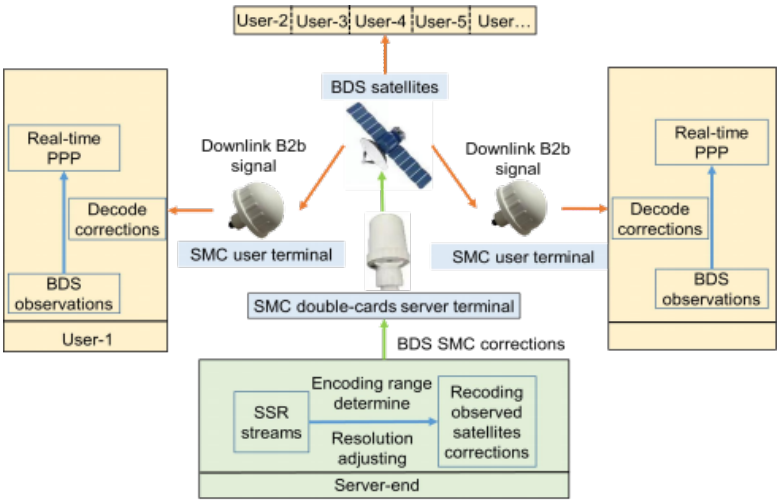


Figure 8 – Real-time precise point positioning based on GBSMC. The bottom serve compresses and forwards the clock and orbit corrections. Left, right and upper multi-users conduct RTPPP based on corrections decoded and observations.

Experiment and results

In order to further verify the positioning performance of the proposed method, themulti-stations kinematic real-time PPP and multi-users kinematic real-time PPP experiments were carried out. The feasibility of the proposed scheme was verified by analyzing the positioning accuracy and convergence time. Due to IMO paying more attention to the horizontal positioning accuracy, the PPP convergence time required that the errors maintain within 0.2 m for 20 epochs in the horizontal direction. The positioning accuracy was the root mean square (RMS) of the positioning errors in the horizontal and vertical directions after convergence. The processing strategy of kinematic real-time PPP based on Extended Kalman Filter (EKF) is shown in Table 6.

Table 6 – Processing strategy for PPP.

Items	Description
Cutoff elevation angle	6。
Observations	IF pseudorange and carrier phase combination
Weighting	Elevation-dependent weighting (Ge et al. 2008)
Signal frequency	BDS: B1I/B3I
IF ambiguities	Estimated as a float constant (Kouba et al. 2001)
Receiver clock error Tropospheric zenith wet delay error	Estimated as white noise Estimated as a random walk process
Position parameter	Estimated as white noise (1e4)
Initial value for X, Y, Z	Single point positioning
Observation noise	Pseudorange: 0.3 m; Carrier phase: 0.003 m
Antenna phase centers	igs14_2188.atx (Loyer et al, 2021)

Multi stations real-time PPP experiment

For the static experiment, the observations of 6 global IGS stations are selected, as shown by the red asterisk in Fig. 9. The stations marked with yellow asterisk are selected to conduct on static experiment in determination of resolution. The static stations experiments are conduced to verify the advantages of the above encoding strategy for global multi-users. The farthest distance was 9130 miles from the station MDO1 to the station MAC1. The observation period was from DOY 152 to DOY 158, 2022 and the sampling interval was 30 s. The station coordinates provided by IGS weekly SINEX solutions were used as the reference to evaluate positioning performance. To evaluate the positioning performance of the proposed encoding scheme, the real-time kinematic

PPP was implemented by processing the collected data. The real-time precise satellite orbit and clock corrections will be updated every minute. Moreover, the real-time PPP based on original SSR with an update interval of 5 s was conducted as a comparison.

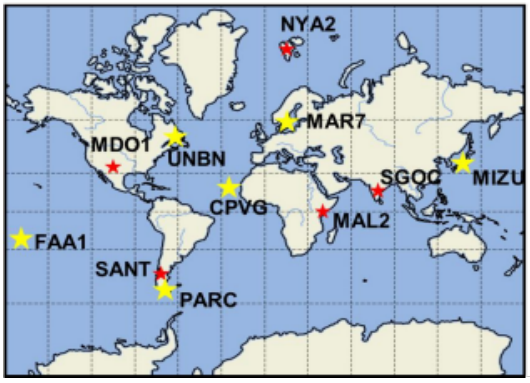


Figure 9 – Distribution of 12 IGS stations.

Taking the MAL2 station observations in DOY 152, 2022 as an example, the positioning errors are respectively shown in the horizontal and vertical directions, as shown in Fig. 10. The red line represents the positioning errors based on the proposed encoding scheme. The blue line represents the positioning errors based on the original SSR. For the proposed encoding scheme and original SSR, the positioning errors in the horizontal and vertical directions were within 0.2 m and 0.4 m, respectively. Due to the resolution adjustment of the real-time precise satellite orbit and clock corrections, the positioning errors of the proposed encoding scheme had a centimeter level volatility compared with original SSR.

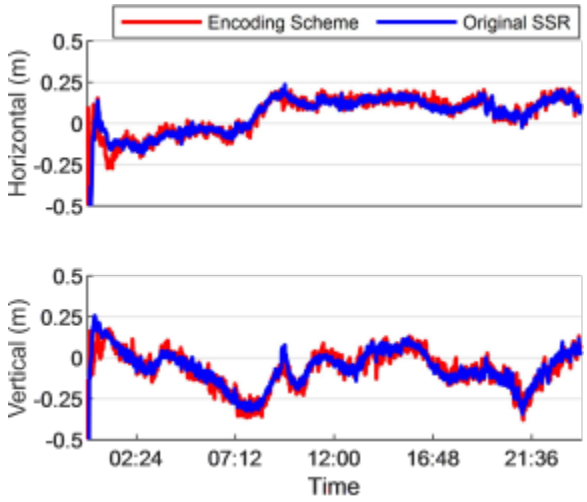


Figure 10 – Positioning error of the proposed encoding scheme and original SSR for the MAL2 station

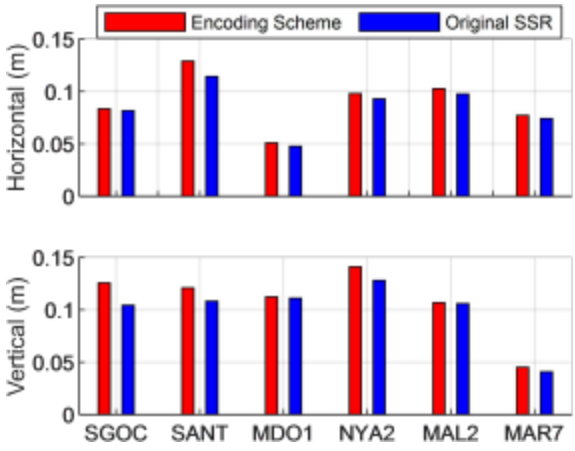


Figure 11 — RMS value statistics in the horizontal and vertical directions for 6 stations.

To further demonstrate the positioning performance of the proposed method. the positioning errors of real-time PPP are analyzed in six different stations, as shown in Fig. 11. For positioning accuracy, Table 7 represents the RMS of 7 days of positioning errors in the horizontal and vertical directions after convergence. Convergence time is represented by CT. The maximum RMS were 0. 129 m and 0. 126 m in the horizontal and vertical directions for the proposed encoding scheme, respectively. For the proposed encoding scheme and original SSR, the average RMS of all stations was 0.090 m and 0.085 m respectively in the horizontal direction. The difference of average positioning accuracy between the proposed encoding scheme and the original SSR was within 1 cm. However, the average convergence time was 32.0 min and 26.2 min for the proposed encoding scheme and original SSR, respectively. Meanwhile, the maximum difference of convergence time between the proposed encoding scheme and the original SSR was 14.5 min for the station MDO1.

Therefore, the decimeter-level positioning services can be achieved based on the proposed encoding scheme with a longer convergence time for any global user.

Table 7 — Positioning performance of different stations under different schemes.

Station	Encoding scheme			Original SSR		
	Vertical (m)	Horizontal (m)	CT (min)	Vertical (m)	Horizontal (m)	CT (min)
SGOC	0.126	0.083	24	0.104	0.082	19.5
SANT	0.121	0.129	35.5	0.108	0.114	27
MDO1	0.112	0.051	58.5	0.111	0.048	44
NYA2	0.141	0.098	29.2	0.128	0.093	26.5
MAL2	0.107	0.103	15.5	0.106	0.098	13.5
MAR7	0.072	0.077	29.5	0.041	0.074	27
Average	0.113	0.090	32.0	0.100	0.085	26.3

Ocean real-time kinematic PPP experiment

The advantages of proposed encoding strategy for global multi-users have been verified in the static stations. For kinematic experiments, we randomly select an ocean platform and a ground-based station for real-time verification. We carried out an ocean kinematic real-time PPP experiment based on the proposed encoding scheme to evaluate the real-time positioning performance on June 1, 2022. Meanwhile, we carried out a ground-based kinematic real-time PPP to verify the ability to serve multi-users. Limited by the absence of GBSMC devices, the RBSMC devices were used, which were BDSC-05 and BDSC-01 produced by the BDStar Navigation company. The service-end device BDSC-05 was composed of dual-card. The user-end devices BDSC-01 composed of a single card were placed on an offshore platform and a ground-based station. The ocean user-end and ground user-end received the encoded corrections and transmitted them to the MA-NP0101 receiver via serial port, respectively. As shown in Fig. 12, the Kongsberg DPS132 receiver and MA-NP0101 receiver are connected to the same HX-CSX601 antenna by a power divider on the offshore platform. Therefore, the distance between the Kongsberg DPS132 receiver and the MA-NP0101 receiver was zero. HX-CSX601 antenna was installed to receive raw observations and transmit them to the MA-NP0101 receiver via a serial port. The MA-NP0101 receiver was installed to carry out real-time PPP solution.



Figure 12 – Experimental devices (server-end: Regional Beidou-2 Short Message Communication device, user-end: two GNSS equipment with multiple GNSS observatiodata reception functions and Regional Beidou-2 Short Message Communication device).

The experimental period was from 6:00:00 to 23:59:59 on June 1,2022. The sampling interval of GNSS observation was 1 s. The ocean kinematic experiment data was collected from ocean platforms, which is more than 200 km away from the coastline. It is difficult to obtain centimeter level reference results through RTK without the assistance of base stations. Moreover, the positioning solutions of Kongsberg DPS132 based on the XP service were chosen as references, which official nominal positioning accuracy is better than 10 cm (https://www.kongsberg.com/maritime/products/vessel-reference-systems/position-systems/differential-absolute-relative-position-sensor/). Meanwhile, the positioning accuracy of Kongsberg DPS132 is better than decimeter-level.

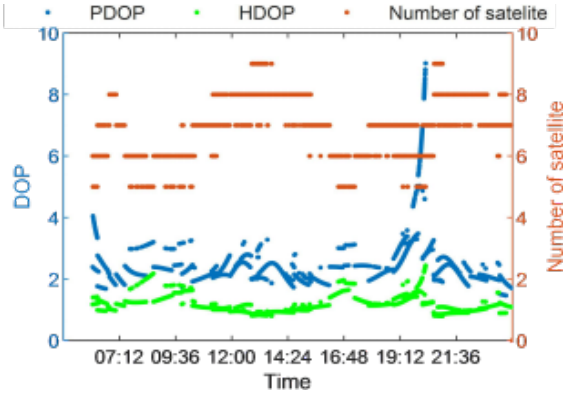


Figure 13 – The number of matched satellites and DOP for ocean real-time PPP

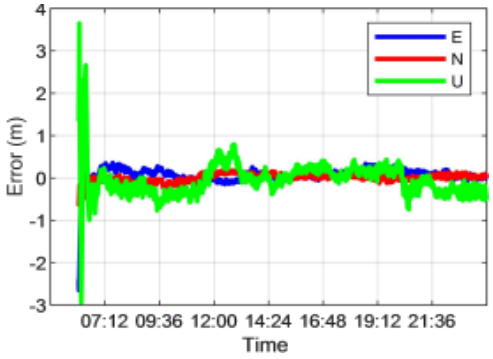


Figure 14 – Ocean real-time PPP positioning error based on the proposed method

Table 8 — Positioning performance statistics for ocean real-time PPP,

Type	Accuracy				Convergence time (min)
	East (m)	North (m)	Horizontal (m)	Vertical (m)	
Value	0.125	0.040	0.132	0.217	29

Fig. 13 shows the time series of the dilution of precision value and the number of BDS-3 MEO satellites involved in positioning. The number of used satellites ranged from 5 to 9, and the Position Dilution Of Precision (PDOP) was between 1.5 and 9, and the Horizontal Dilution Of Precision (HDOP) was between 0.5 and 2, which were sufficient to realize real-time PPP decimeter-level positioning accuracy. It is worth noting that theabnormal PDOP fluctuations was due to fewer satellites, but the HDOP value was not abnormal. It shows that the geometric configuration in the vertical direction was poor, and the vertical error has increased. Fig. 14 shows the positioning errors series ofkinematic real-time PPP based on the proposed method in the east, north, and up directions. After convergence, the positioning errors were relatively stable at the decimeter-level. The convergence time and positioning accuracy are summarized in Table 8. The horizontal and vertical positioning accuracy were 0.132 m and 0.217 m, respectively. The convergence time was 29 min. Therefore, the positioning accuracy difference between the proposed method and the Kongsberg product was at the decimeter-level.

At the same time, in order to verify the ability to serve multi-users, the ground-based kinematic experiment data was collected from the base station at Harbin Engineering University. The reference solution of Harbin Engineering University was calculated by PPP based on the IGS final precise ephemeris, which is at the centimeter level accuracy (Kouba. 2009).

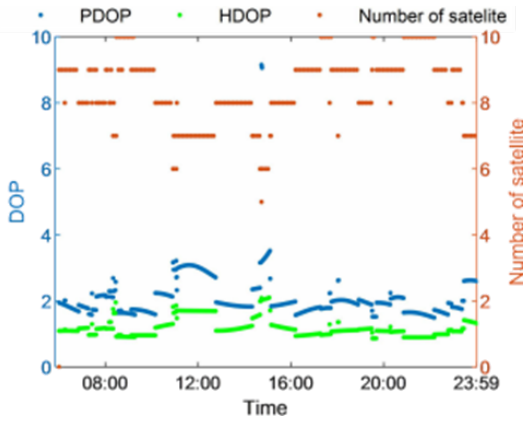


Figure 15 – The number of matched satellites and DOP for ground real-time PPP.

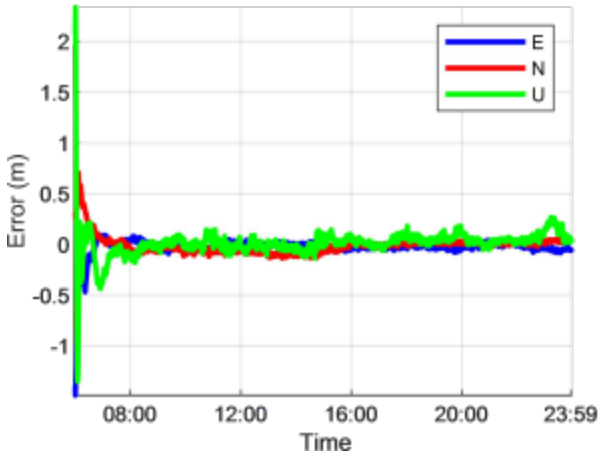


Figure 16 – Ground real-time PPP positioning error based on the proposed method.

Table 9 – Positioning performance statistics for ground real-time PPP.

Type	Accuracy				Convergence time (min)
	East (m)	North (m)	Horizontal (m)	Vertical (m)	
Value	0.023	0.0140	0.027	0. 054	26

Fig. 15 shows the time series of the Dilution of Precision (DOP) value and the number of BDS-3 MEO satellites involved in positioning. The number of used satellites ranged from 5 to 10, and the PDOP was between 1.5 and 3.5, which was sufficient to realize real-time PPP decimeter-level positioning accuracy. Fig. 16 shows the positioning errors series of kinematic real-time PPP based on the proposed method in the east, north, and up directions. After convergence, the positioning errors were relatively stable at the decimeter level. The convergence time and positioning accuracies are summarized in Table 9. The horizontal and vertical positioning accuracies were 0.027 m and 0.054 m, respectively. The convergence time was 26 min. Therefore, the proposed encoding scheme has an ability to provide a multi-users decimeter-level positioning service.

Conclusions

GBSMC has been widely used to broadcast the real-time precise satellite orbit and clock corrections in the ocean application. In order to overcome the restrictions that GBSMC can only broadcast regional visible satellites for the limited users, several optimization schemes were proposed to provide decimeter-level positioning services for global multi-users. Ocean decimeter-level real-time BDS PPP method based on dual-card GBSMC to implement global positioning services. First, the statistical distribution of real-time precise satellite orbit and clock corrections was analyzed, and the encoding ranges of real-time precise satellite orbit and clock corrections were redefined to 3.5 m and 61.5 m to adapt the narrow bandwidth characteristic of GBSMC. Second, to balance the relationship between the number of GBSMC cards and the resolutions of corrections, the resolutions of real-time precise satellite radial, along-track, cross-track and clock corrections were adjusted as 0.030 m, 0. 125 m, 0. 125 m, 0.030 m to broadcast global 24 BDS MEO satellites based on dual-card GBSMC. Last, aiming at the frequency limitation of GBSMC, the real-time correction method at the user-end was employed due to the change of equivalent distance within 1 minute at the centimeter level. In order to verify the effectiveness of the proposed method, the real-time PPP experiment was carried out based on six global stations. The PPP experiment showed that the average positioning accuracies were 0.089 m and 0.103 m in the horizontal and vertical directions. The maximum RMS was 0. 129 m and 0. 126 m in the horizontal and vertical directions. The average convergence time was 29.6 min. However, the maximum convergence time difference between the proposed method and the original SSR was 14.5 min for

the MDO1 station. Therefore, the decimeter-level positioning accuracy can be achieved based on the proposed method with a longer convergence time for global multi-users. Real-time kinematic PPP experiments had been carried out in the ocean and on the ground. The result showed that the positioning accuracy in the horizontal and vertical directions was 0. 132 m and 0.217 m in the ocean, respectively. The convergence time was 29.00 min. Compared with the XP service of Kongsberg DPS132 receiver, the positioning accuracy of the proposed method was reduced to the centimeter level. At the same time, the ground positioning accuracy in the horizontal and vertical directions was 0.027 m and 0.054 m, respectively. Consequently, the experimental results demonstrate that the proposed method can provide decimeter-level services for global multi-users. In addition, only the RBSMC device was used for the ocean kinematic PPP experiments; The offshore multi-platform test based on GBSMC needs to be further verified.

Acknowledgements

The authors would like to thank the reviewers for the constructive comments to improve our manuscript and acknowledge IGS for providing the data. This research was jointly funded by the National Key Research and Development Program (No. 2021YFB3901300), the National Natural Science Foundation of China (Nos. 62003109), the China Postdoctoral Science Foundation (No. 2023M730831), the Heilongjiang Province Research Science Fund for Excellent Young Scholars (No. YQ2020F009).

Data availability The GNSS data are provided by the IGS, and they are obtained through ftp://igs.gnsswhu.cn.

Authors' contributions FY and GL wrote the manuscript. GL made the figure. JZ and ZS collected data in the experiment. All authors revised the manuscript.

REFERENCES

1. Ashby, N. (2003). Relativity in the global positioning system. Living Reviews inrelativity, 6(1), 1-42.

2. China Satellite Navigation Office (CSNO) (2019) Development of the BeiDou Navigation Satellite System Version 4.0. Beijing, China.

3. Dai L, Chen Y, Lie A, Zeitzew M, Zhang Y (2016) StarFire™ SF3: Worldwide centimeter-accurate real time GNSS positioning. Proc. ION GNSS 2016, Institute of Navigation, Portland, Oregon, USA, September 12- 16, 3295-3320.

4. Geng J, Teferle F, Meng X, Dodson A (2010a) Kinematic precise point positioning at remote marine platforms. GPS solutions 14(4):343-350.

5. Geng J, Meng X, Dodson A (2010b) Integer ambiguity resolution in precise point 635 positioning: method comparison. J Geod 84, 569–581. https://doi.org/10. 1007/s00190-010-0399-x.

6. Geng T, Ma Z, Xie X, Tao J, Liu T, Zhao Q, Li J. (2022a) Multi-GNSS real-time precise point positioning using BDS-3 global short-message communication to broadcast corrections. GPS Solutions 26(3):1- 13.

7. Geng T, Cheng L, Xie X, Liu J, Li Z, Jiang R (2022b) GNSS real-time precise point positioning with BDS-3 global short message communication devices. Advances in Space Research 70(3):576-586 https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.04.068.

8. Gu S, Guo R, Gong X, Zhang S, Lou Y, Li Z (2022) Real-time precise point positioning based on BDS-3 global short message communication. GPS Solutions 26(4):1- 14.

9. Ge M, Gendt G, Rothacher M, Shi C, Liu J (2008) Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in precise point positioning (PPP) with daily observations. Journal of geodesy, 82(7), 389.

10. Hadas T, Bosy J (2015) IGS RTS precise orbits and clocks verification and quality degradation over time. GPS solutions 19(1):93- 105.

11. He K, Weng D, Ji S, Wang Z, Chen W, Lu Y (2020) Ocean real-time precise point positioning with the BeiDou short-message service. Remote Sensing 12(24):4167 IMO. (2002).

12. International Maritime Organization (IMO) Resolution A. 915(22) Revised maritime policy and requirements for a future GNSS. Adopted on January 22nd, 2002, London. http://puc.overheid.nl/doc/PUC_ 1412_ 14.

13. IGS (2020) IGS State Space Representation (SSR) Format version 1.00. https://files.igs.org/pub/data/format/igs_ssr_v1.pdf.

14. Ji R, Jiang X, Chen X, Zhu H, Ge M, Neitzel F (2022) Quality monitoring of real-time GNSS precise positioning service system. Geo-spatial Information Science 1- 15.

15. Kouba J, Héroux P (2001) GPS precise point positioning using IGS orbit and clock products. GPS Solutions 5(2):12-28.

16. Kouba J (2009) A guide to using International GNSS Service (IGS) products.

17. Li B, Zhang Z, Zang N, Wang S (2019) High-precision GNSS ocean positioning with BeiDou short-message communication. Journal of Geodesy 93:125- 139.

18. Li L, Jia C, Zhao L, Cheng J, Liu J, Ding J (2016) Real-time single frequency precise point positioning using SBAS corrections. Sensors 16(8):1261. https://doi.org/10.3390/s16081261.

19. Leandro R, Landau H, Nitschke M, Glocker M, Seeger S, Chen X, Kipka A (2011) RTX positioning: The next generation of cm-accurate real-time GNSS positioning. Proc. ION GNSS 2011, Institute of Navigation, Portland, Oregon, USA, September 20–23, 1460- 1475.

20. Loyer S, Banville S, Geng J, Strasser S (2021) Exchanging satellite attitude quaternions for improved GNSS data processing consistency. Advances in Space Research, 68(6), 2441-2452.

21. Lv Y, Geng T, Zhao Q, Xie X, Zhou R (2019) Initial assessment of BDS-3 preliminary system signal-in-space range error. GPS Solutions 24(1):1– 13.

22. Montenbruck O, Steigenberger P, Hauschild A (2015) Broadcast versus precise ephemerides: a multi-GNSS perspective. GPS solutions 19:321-333.

23. Nie Z, Wang B, Wang Z, He K (2020) An offshore real-time precise point positioning technique based on a single set of BeiDou short-message communication devices. Journal of Geodesy 94(9):1- 11.

24. Saastamoinen J (1972) Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging satellites. The use of artificial satellites for geodesy 15:247-251.

25. Tegedor J, Lapucha D, Ørpen O, Vigen E, Melgard T, Strandli R (2015). The new G4 service: multi-constellation precise point positioning including GPS, GLONASS, Galileo and BeiDou. Proc. ION GNSS 2015, Institute of Navigation, Tampa, Florida, USA, September 14– 18, 1460- 1475.

26. Tao J, Liu J, Hu Z, Zhao Q, Chen G, and Ju B (2021) Initial Assessment of the BDS-3 PPP-B2b RTS compared with the CNES RTS. GPS Solutions 25(4):1- 16.

27. Wu J, Wu S, Hajj G, Bertiger W, Lichten S (1993) Effects of antenna orientation on GPS carrier phase. Astrodynamics 1991, 1647- 1660.

28. Yang F, Zhao L, Li L, Feng S, Cheng J (2019a) Performance evaluation of kinematic BDS/GNSS real-time precise point positioning for maritime positioning. The Journal of Navigation 72(1):34-52 https://doi.org/10.1017/S0373463318000644.

29. Yang Y, Gao W, Guo S, Mao Y, Yang Y (2019b) Introduction to BeiDou-3 navigation satellite system. Navigation 66(1):7- 18.

30. Yang R, Li L, Yang F, Zhang J, Zhao L (2021) Research on real-time precise point positioning method based on short message communication. In Proceedings of the CSNC 2021, Springer, Singapore, pp 547-559 https://doi.org/10.1007/978-981-16-3138-2_51.

31. Zumberge J, Heflin M, Jefferson D, Watkins M, Webb F (1997) Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. Journal of geophysical research solid earth 102(B3):5005-5017.

32. Zhang R, He Z, Ma L, Xiao G, Guang W, Ge Y, Li X (2022) Analysis of BDS-3 PPP-B2b Positioning and Time Transfer Service. Remote Sensing 14(12):2769. https://doi.org/10.3390/rs14122769.

33. Zhang L, Yang H, Gao Y, Yao Y, Xu C (2018) Evaluation and analysis of real-time precise orbits and clocks products from different IGS analysis centers. Advances in Space Research 61(12):2942-2954 https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.03.029.

УДК 004.942 DOI: 10.37816/eeste-2024-1-157-163

ОЦЕНКА И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ НА ФОРМИРОВАНИЕ ВЕТРОВОГО РЕЖИМА ТЕРРИТОРИИ
ASSESSMENT AND NUMERICAL SIMULATION OF THE INFLUENCE OF VEGETATION ON THE FORMATION OF THE WIND REGIME OF THE TERRITORY

Олег Иванович Седляров, Елена Сергеевна Бородина, Тамара Евгеньевна Каданцева, Анна Вениаминовна Чугарова, Дмитрий Николаевич Яровой, Бошра Али
Oleg I. Sedlyarov, Elena S. Borodina , Tamara E. Kadantseva, Anna V. Chugarova, Dmitriy N. Yarovoy, Boshra Ali

Российский Государственный Университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство) Россия, Москва
The Kosygin State University of Russia, Russia, Moscow
(e-mail: sedlyarov-oi@rguk.ru)

Аннотация: Проведено численное моделирование влияния растительного покрова на формирование ветрового режима в непосредственной близости от полигонов твердых коммунальных отходов. Проведен полный цикл моделирования с использование свободного программного обеспечения. Растительный покров представлен в виде плоского пористого экрана. Модель позволяет задавать необходимую ветропроницаемость экрана, моделируя различные виды растительности. На примере объекта простой геометрической формы рассчитаны характеристики воздушных потоков. Показано, что растительного покрова будет оказывать существенное влияние на изменение характера движения воздушных потоков.

Abstract: Numerical modeling of the influence of vegetation cover on the formation of the wind regime in the immediate vicinity of solid municipal waste landfills was carried out. A full cycle of modeling was carried out using free and open-source software. The vegetation cover is presented in the form of a flat porous screen. The model allows you to set the required wind permeability of the screen, simulating various types of vegetation. Using an example of an object of simple geometric shape, the characteristics of air flows were calculated. It has been shown that vegetation cover will have a significant impact on changing the nature of air flow.

Ключевые слова: ветровой режим территории, растительный покров, ветропроницаемость, полигоны твердых коммунальных отходов, негативное воздействие на окружающую среду, численное моделирование, свободное программное обеспечение

Keywords: wind regime of the territory, vegetation cover, wind permeability, solid municipal waste landfills, negative impact on the environment, numerical modeling, free and open-source software.

В Московской области ежегодно образуется порядка 9,5 млн. тонн отходов производства и потребления. До введения в эксплуатацию современных комплексов по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов, большая часть отходов напрямую размещалась на полигонах. При этом обязательные требования к устройству полигонов выполнены не были, зачастую размещение отходов происходило на отработанных карьерах, кроме того, в процессе эксплуатации природоохранные мероприятия зачастую также не выполнялись. На территории Московской области в настоящее время закрыто 39 полигонов.

Назначение полигонов твердых отходов заключается в защите окружающей среды от продуктов разложения твердых коммунальных отходов (ТКО). В настоящее время понятие ТКО объединяет твердые бытовые и твердые муниципальные отходы. Полигон, согласно требованиям, должен располагаться на площади, основанием которой являются глина и тяжелые суглинки, либо необходимо создание водонепроницаемого основания. Средняя площадь полигона может составлять от 50 до 300 гектар. Высота складирования отходов не

должна превышать 60 метров от основания. Полигоны ТКО имеют слоистое строение. При этом производится постоянное уплотнение свалочных масс в ходе послойного заполнения карты полигона.

Одной из характерных особенностей современных полигонов ТКО является то, что тело полигона может возвышаться над уровнем окружающей территории на десятки метров, достигая высоты 50-70 метров и более. Современные методы расчета, применяемые для оценки воздействия намечаемой хозяйственной или иной деятельности на качество атмосферного воздуха, предназначены для расчетов на ровной или слабопересеченной местности с перепадом высот не превышающем 50 м на 1 км, что не позволяет их использовать для расчетов.

Одним из наиболее существенных факторов, определяющим рассеивание загрязняющих веществ является ветровой режим территории, на которой расположены источники выбросов загрязняющих веществ. Под ветровым режимом понимают ветровые условия в определенной местности, особенности распределения и перемены скорости и направления ветровых потоков, их ежегодные и ежедневный процесс, а также характеристики ветров разных течений и скоростей [1].

Необходимо отметить, что особенности климата, прежде всего ветрового режима, небольших локальных территорий определяются особенностями близь расположенной местности, характер рельефа – защищенность от ветров различных направлений, направление и высота склонов, характер растительности – лес, поле, водный объект, болото и другие.

Характер растительности оказывает существенное влияние на характеристики ветрового режима что необходимо учитывать при моделировании. Значительная часть Московской области расположена в лесной зоне. Леса занимают около 40% территории. Необходимо отметить, что характер лесов значительно меняется. Так на севере Московской области преобладают еловые леса с относительно небольшим количеством широколиственных пород. Для востока области характерны сосновые леса. Центральная и южная части Московской области заняты широколиственными лесами, а самая южная часть области относится к лесостепной зоне. Значительные площади отведены под сельскохозяйственное использование.

Для оценки ветрового режима используются несколько различных походов. Так, например, в [2] для определения направления ветра на местности со сложной структурой рельефа можно использовать моделирование устойчивости массы или диагностического потока. При таком подходе воздушный поток “подгоняется” к особенностям рельефа путем минимальных изменений исходных показателей и сохранения постоянства массы. Поскольку этот подход дает быстрые результаты, он также может быть использован для расчета статистики ветра для участка местности, где невозможны наблюдения. Для этого используются геострофические статистические данные (например, данные из верхних слоев атмосферы, полученные с шаров-зондов).

Если все же необходимо рассматривать термальные ветровые системы более подробно, то следует воспользоваться так называемыми прогностическими моделями. В зависимости от величины и рельефа моделируемой местности можно применять гидростатический или даже более сложный негидростатический метод [3]. Модели этого типа требуют сложной компьютерной обработки, а также большого опыта в их применении.

Агентством по охране окружающей среды США для проведения расчетов, носящих нормативный характер, рекомендована методика ISC3ST [4, 5]. Эта модель является одной из наиболее универсальных моделей рассеивания, реализующих Гауссовскую модель. Достоинством гауссовой методики является ее сравнительно высокая точность при достаточно простой параметризации влияющих на рассеяние примесей факторов. Однако эта модель имеет ряд серьезных недостатков и в некоторых случаях неприменима. В Российской Федерации приказом Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 6 июня 2017 г. № 273 «Об утверждении методов расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух» методика ОНД-86 [6] признана

неподлежащей к применению на территории Российской Федерации с 1 января 2018 г. Документом [7] установлен новый механизм расчета концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе. Следует отметить, что данный нормативно-правовой документ не внес принципиальных изменений в методы расчета рассеивания загрязняющих веществ.

В настоящее время для моделирования ветровых процессов широко используется современное программное обеспечение, предназначенное для решения задач вычислительной гидродинамики (computational fluid dynamics, CFD). Значительное число исследований выполнено с использованием современных коммерческих программных продуктов, характерной особенностью которых является высокая стоимость базового программного обеспечения и, как правило, необходимость дополнительных затрат для расчетов на многопроцессорных системах.

Целью настоящей статьи является рассмотрение возможности учета влияния растительности на характеристики ветрового режима территории с использованием свободного программного обеспечения.

В качестве объекта моделирования рассматривается полигон ТКО, представляющей собой усеченную пирамиду с основанием размерами 460 х 170 м и высотой 38 м. (рисунок 1). Наружные откосы на первой очереди выполнены заложением 1:2. Общая высота первой очереди полигона составляет 15 м. На второй очереди наружные откосы выполнены заложением 1:1, а теоретическая высота составляет 13 м. Наружные откосы третьей очереди выполнены заложением 1:1 и высотой 12м, которая перекрыта сверху слоем суглинка толщиной 1 м. Общая теоретическая высота полигона составляет 38 м, а его теоретическая вместимость составит 1 870 216 м^3[11].

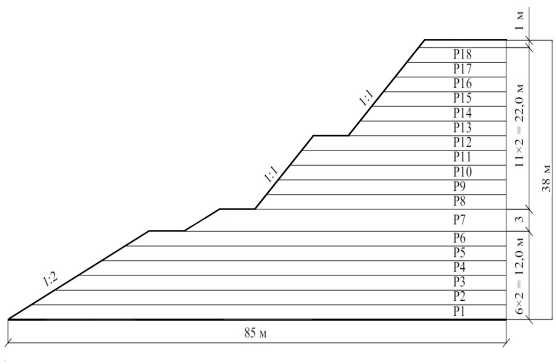


Рисунок 1 — Схема полигона ТКО (левая часть до оси симметрии) [8]

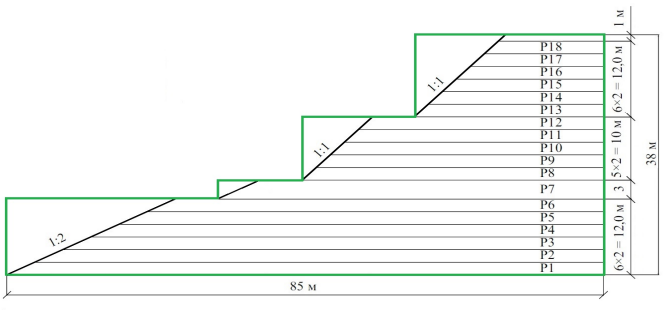
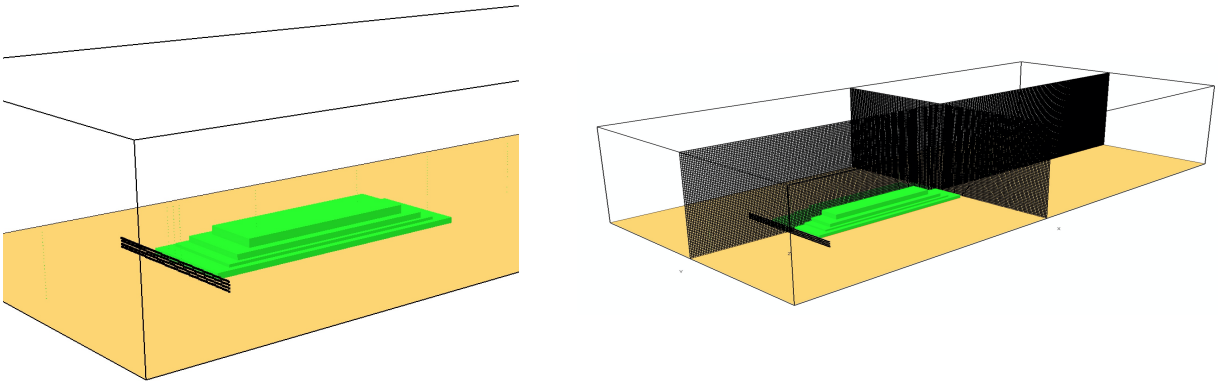


Рисунок 2 — Расчетная схема полигона ТКО (левая часть до оси симметрии)

На основе схемы полигона ТКО была создана расчетная схема полигона, учитывающая особенности используемого программного обеспечения и, прежде всего, особенности создания расчетной сетки (рисунок 2). Тело полигона представлено в виде 4 прямоугольных параллелепипедов, размещенных один на другом.

На рисунке 3 представлена модель расчетной области с размещенной на ней телом полигона и объектом, имитирующим растительность. Объект, имитирующий растительность, представлен в виде плоского пористого экрана высотой 20 м.

Затем, была создана конечно-объемная расчетная сетка (Mesh) для области течения вокруг модели полигона размерами 1500 х 700 х 300 м. Геометрический центр основания тела полигона совпадает с центом декартовой системы координат таким образом, что ось X совпадает с большей осью основания усеченной пирамиды, а ось Z направлена вертикально вверх. В качестве расчетной сетки использовалась сетка с количеством ячеек 375 х 175 х 60 по осям X, Y, и Z, соответственно. общее количество расчетных ячеек составило около 4 млн. (Рисунок 3б).



а) б)

Рисунок 3 — Расчетная область

Для изучения ветрового режима территории (внешняя аэродинамика) решалась система нестационарных дифференциальных уравнений, включающая в себя уравнение состояния, уравнения сохранения массы и количества движения (импульса), уравнения переноса, определяемые соответствующими физическими моделями (например, моделями турбулентности и другими) с соответствующими начальными и граничными условиями, позволяющими однозначно определить условия задачи [9, 10].

В качестве граничных условий для задания профиля ветра использовался метод The «Wall of Wind» [14] со скоростью 15 м/с по направлению оси X.

Для решения поставленной задачи был использован программный пакет FDS-SMV [11], представляющий собой свободно распространяемый инструментарий, предназначенный для моделирования больших вихрей (LES) для низкоскоростных потоков.

Влияние растительности имитировалось размещением плоского пористого экрана, расположенного на ближней к телу полигона границе лесного массива со стороны движения ветрового потока.

В зависимости от конкретных характеристик растительности, расположенной в непосредственной близости от исследуемой территории, можно выделить три основных вида насаждений. Далее, для общности с [12] будем называть насаждения – лесозащитными полосами. Конструкция лесозащитной полосы является определяющей для степени и характера ее ветропроницаемости и зависит от высоты, ширины, ярусности и плотности насаждения, состава пород и др. факторов.

Различают 3 основных конструкции полос — непродуваемую (плотную), ажурную и продуваемую. Полосы непродуваемой конструкции в облиственном состоянии почти не имеют сквозных просветов в продольном профиле (до 10%). Через такие полосы ветер почти не проникает, а переваливается над ними и создаёт зону штиля в приземном слое за полосой; по мере удаления от полосы скорость ветра быстро возрастает. Зона ветрозащитного влияния лесной полосы с заветренной стороны, к-рая обычно в среднем равна 15 — 20 высотам (Н) полосы (15 — 20 Н), зачастую уменьшается (до 10— 15 Н), т. к. скорость ветра за полосой быстро нарастает. С наветренной стороны непродуваемые лесные полосы на довольно значит, расстоянии (до 10 Н) снижают скорость ветра, но не более чем на 25% [15].

Лесные полосы ажурной конструкции — узкие с мелкими, сквозными, равномерно распределёнными по всему профилю просветами (их площадь 15—35%). Они делят ветровой поток на две части: одна часть проходит через полосу, не меняя основного направления, другая — переваливается через насаждение. Вследствие тормозящего взаимодействия двух частей ветрового потока ажурные полосы на значительном расстоянии (30 Н) снижают скорость ветра, в основном на заветренной стороне. Они уменьшают скорость ветра на защищаемой территории в среднем на 50—55% [13].

Лесные полосы продуваемой конструкции сильно ветропроницаемы снизу благодаря крупным просветам между стволами деревьев (площадь просветов 60—70%), но мало ветропроницаемы в верхней части (площадь просветов до 10%). Они также делят ветровой поток на две части и уменьшают скорость ветра на расстоянии 30 Н, в основном с заветренной стороны [12].

Основной характеристикой моделируемого экрана, характеризующей его ветропроницаемость, является параметр FREE_AREA_FRACTION, который можно рассматривать как долю открытой (проницаемой) поверхности экрана.

Перепад давления на экране определялся по формуле (1) [14]:

$$\Delta p = l\left(\frac{\mu}{K}u + \rho\frac{Y}{\sqrt{K}}u^2\right) \quad (1)$$

где l — толщина сетки, μ — вязкость газа, u — скорость, нормальная к сетке, ρ — плотность газа, а K и Y — эмпирические константы, заданные по формулам (2, 3) [16]:

$$K = 3.44\times10^{-9} * \text{FREE_AREA_FRACTION}^{1.6} \quad (2)$$

$$Y = 0.043 * \text{FREE_AREA_FRACTION}^{2.13} \quad (3)$$

В заключении исследований был проведен анализ результатов расчетов. Современное программное обеспечение позволяет не только оценить численные результаты расчетов, но провести их обработку и визуализацию.

Как показал проведенный анализ, крупный техногенный объект, каким является полигон ТБО, оказывает значительное влияние на параметры ветрового режима в непосредственной близости от своей территории.

На рисунке 4 представлены профили скорости воздушного потока на различных расстояниях относительно пористого экрана и тела полигона, чтобы оценить его влияние на характер течения. Учитывая турбулентный характер течения и способ моделирования больших вихрей (LES) для низкоскоростных потоков проводилось осреднение характеристик течения на большом временном промежутке времени равном 300 с.

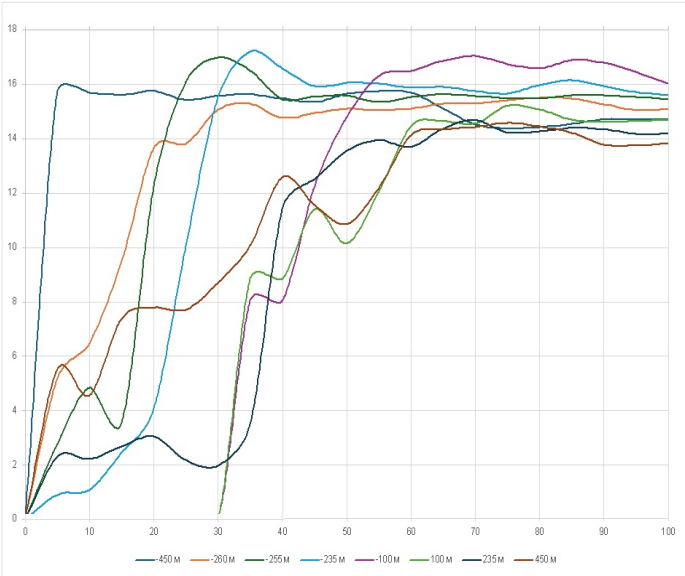


Рисунок 4 — Осредненные по времени профили скорости воздушного потока

Предварительные расчеты показывают, что профили скорости претерпевают существенные изменения непосредственно за пористым экраном.

На рисунке 5 представлен вертикальный разрез поля скорости течения (плоскостью XoZ при Y=0). Визуализация поля течения, представленная на рисунке 5, позволяет оценить размеры и расположение зоны влияния пористого экрана.

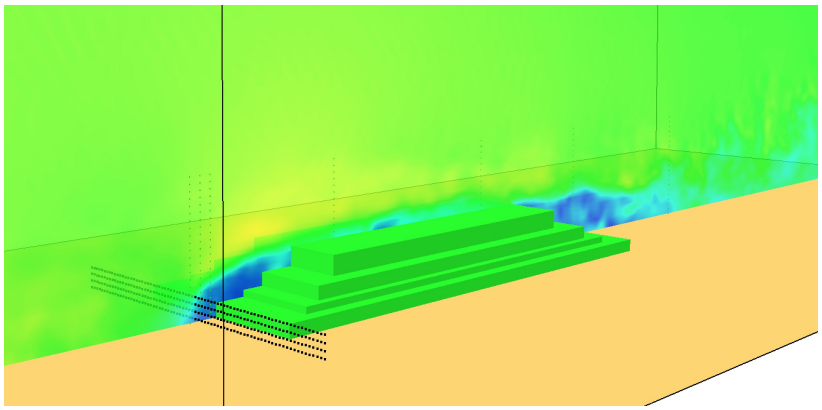
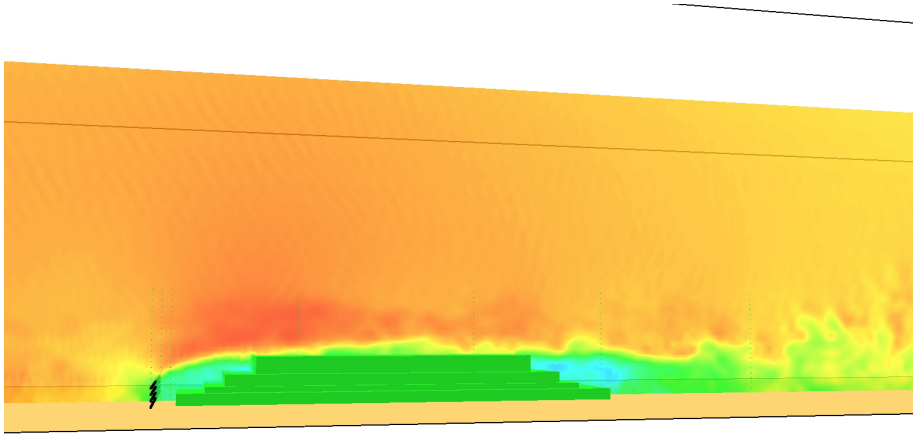
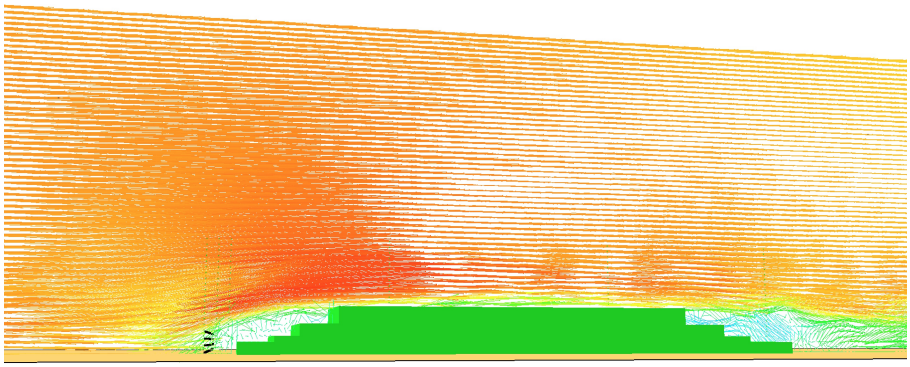


Рисунок 5 — Вертикальный разрез поля скорости течения

На рисунках 6а и 6б более подробна представлена картина течения (X-составляющая скорости потока) в области непосредственно примыкающей к пористому экрану (зона растительности) и телу полигона как с наветренной, так и с подветренной сторон.



а)



б)

Рисунок 6 — X-составляющая скорости потока

Представленный в работе подход к исследованию влияния растительности на ветровой режим территории с использованием свободного программного обеспечения показал, что растительность оказывает существенное влияние на ветровой режим, что в свою очередь будет сказываться на характере распространения (рассеивания) загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы и, соответственно, требует учета. Моделирование позволяет еще на стадии проектирования изучить процессы, происходящие в непосредственной близости от подобных

объектов, оценить их влияние, а также выдать научно обоснованные рекомендации по размещению растительности для минимизации негативного воздействия и оценить эффективность каждого из мероприятий.

Задачами дальнейших исследований является моделирование ветрового режима для различных видов растительности, а также учета неоднородности растительного покрова как по площади, так и по высоте.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кравченко М.И. Детровой режим и инсоляция городских территорий. Теория и практика современной науки, 2021. № 2(68). С. 110–121

2. Pielke, R. A. Mesoscale Meteorological Modeling / R. A. Pielke. – New York : Academic Press, 1984. – 612 p.

3. VDI Guideline 3945. Part 1. Environmental meteorology - Atmospheric dispersion models; Gaussian Puff Model . – Technical Division Environmental Meteorology. – 1996. – 36 p.

4. 272. User’s Guide for the Industrial Source Complex (ISC3) Dispersion Models, Volume 1 User Instructions : Volume 1. – Environmental Protection Agency, 1995. – 391 p.

5. 273. User’s Guide for the Industrial Source Complex (ISC3) Dispersion Models, Volume 2 Description of Model Algorithms : Volume II. – Environmental Protection Agency, 1995. – 129 p.

6. Общесоюзный нормативный документ. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ содержащихся в выбросах предприятий (ОНД-86) : не подлежит применению: [утверждена Председателем Государственного комитета СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды 4 августа 1986 г. N 192 : дата введения 1987-01-01]. – Ленинград : Гидрометеоиздат, 1987. – 92 с.

7. Методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе: [утверждены приказом Минприроды России от 6 июня 2017 года N 273 : подлежат применению с 1 января 2018 года]. – Текст : электронный // Электронный фонд нормативно-технической и нормативно-правовой информации Консорциума «Кодекс» [сайт]. – URL: https://docs.cntd.ru/document/456074826 (дата обращения: 04.08.2020).

8. Офрихтер В.Г., Батракова Г.М., Слюсарь Н.Н. Моделирование напряженно-деформированного состояния полигона твердых коммунальных отходов // Вестник МГСУ. 2020. т. 15. вып. 6. с. 776–788. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.6.776-788

9. Численный алгоритм моделирования двухфазных течений с учетом сжимаемости, вязкости и массовых сил/ Крапошин М. В., Кухарский А. В., Корчагова В. Н., Шевелёв А. А. //Промышленные процессы и технологии. 2022. Т.2. No3(5). С.6–27. DOI: 10.37816/2713-0789-2022-2-3(5)-6-27

10. Моделирование распространения загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы с учетом влияния застройки и рельефа местности / О. И. Седляров, Е. С. Бородина // Промышленные процессы и технологии. 2022. Т. 2. № 2(4). С. 8–25 DOI: 10.37816/2713-0789-2022-2-2(4)-8-25

11. Fire Dynamics Simulator (FDS) and Smokeview (SMV) : сайт. – Екатеринбург, 2007 – . – URL: http://fds.sitis.ru/ (дата обращения: 07.07.2021). – Текст : электронный.

12. Лесная энциклопедия: В 2-х т./Гл.ред. Воробьев Г.И.; Ред.кол.: Анучин Н.А., Атрохин В.Г., Виноградов В.Н. и др. - М.: Сов. энциклопедия, 1985.-563 с., ил.

13. T. Bartzanas, T. Boulard, and C. Kittas. Numerical simulation of the airflow and temperature distribution in a tunnel greenhouse equipped with insect-proof screens in the openings. Computers and Electronics in Agriculture, 34:207–221, 2002. 206

СЕКЦИЯ 3. «ПРОЦЕССЫ И СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ТЕХНОСФЕРЫ (ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ, УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ)»

УДК 621.928 DOI: 10.37816/eeste-2024-1-164-167

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХСТУПЕНЧАТОЙ СИСТЕМЫ ПЫЛЕУЛАВЛИВАНИЯ ЦИКЛОН — ВИХРЕВОЙ ПРОТИВОТОЧНЫЙ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЬ ДЛЯ ОЧИСТКИ ГАЗОВ В ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ
STUDY OF TWO-STAGE DUST COLLECTION SYSTEM CYCLONE — VORTEX COUNTERFLOW DUST COLLECTOR INTENDED FOR GASES CLEANING IN THE THERMAL TECHNOLOGICAL INSTALLATIONS

Александр Васильевич Акулич*, Виктор Михайлович Лустенков*, Вера Михайловна Акулич**
Alexander Vasilyevich Akulich*, Viktor Mikhailovich Lustenkov*, Vera Mikhailovna Akulich**

**Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий, Республика Беларусь, Могилев*
**Belarusian State University of Food and Chemical Technologies, Republic of Belarus, Mogilev*
***Белорусско-Российский университет, Республика Беларусь, Могилев*
***Belarusian-Russian University, Republic of Belarus, Mogilev*
(email: mail@mgup.by)

Аннотация: Создана лабораторная установка двухступенчатой системы пылеулавливания циклон-вихревой противоточный пылеуловитель, приведены результаты экспериментальных исследований гидравлического сопротивления и эффективности улавливания мелкодисперсных пылей в данной установке. Получены зависимости для расчета общего гидравлического сопротивления и эффективности улавливания двухступенчатой системы от кратности расходов и относительного объемного расхода воздуха.

Abstract: A two-stage dust collection system cyclone-vortex counterflow dust collector laboratory installation has been created, and the hydraulic resistance experimental study results and the fine dust collecting efficiency in the given installation have been presented. Dependencies for the total hydraulic resistance and a two-stage system capture efficiency on the flow rate and relative volumetric air flow calculating have been obtained.

Ключевые слова: двухступенчатая система пылеулавливания, циклон, вихревой противоточный пылеуловитель, мелкодисперсные пыли, гидравлическое сопротивление, эффективность улавливания, кратность расходов.

Key words: two-stage dust collection system, cyclone, vortex counterflow dust collector, fine dust, hydraulic resistance, collection efficiency, flow rate.

Во многих отраслях химической, текстильной, пищевой промышленности стоит проблема высокоэффективной очистки пылегазовых потоков от мелкодисперсных твердых частиц [1-2]. Для решения данной проблемы в промышленных технологических и теплотехнологических установках находят применение различные способы и аппараты для очистки запыленных газовых потоков, а именно: циклоны различных типов, рукавные и зернистые фильтры, вихревые противоточные и прямоточные пылеуловители, комбинированные и мокрые пылеуловители [3-6].

Одним из направлений повышения эффективности пылеочистки является разработка двухступенчатых систем, состоящих из последовательно установленных пылеуловителей

различного типа. В данном случае важно использовать преимущества каждого типа оборудования при решении конкретной технологической задачи. При этом необходимо обеспечить требуемую производительность при высокой степени очистки пылегазовых потоков и наименьшем гидравлическом сопротивлении.

Авторами разработана схема и создана лабораторная установка двухступенчатой системы пылеулавливания, обеспечивающей снижение гидравлического сопротивления при высокой эффективности улавливания дисперсных материалов за счет рационального использования особенностей гидродинамики каждого из пылеуловителей [7-8]. Установка состоит на первой ступени из циклона ЦН-24 диаметром цилиндрической части $D_ц$= 0,2 м и углом наклона входного патрубка 24°, который обеспечивает повышенную производительность при наименьшем гидравлическом сопротивлении и предназначен для улавливания крупной пыли. Для циклонов данного типа рекомендован интервал плановой скорости 2,5÷4 м/с. На второй ступени вихревой противоточный пылеуловитель ВПП-140. Вихревые пылеуловители являются аппаратами с управляемой гидродинамикой, что позволяет регулировать режим работы, подбирая оптимальные параметры процесса пылеочистки [3, 6]. А реализация взаимодействия двух закрученных потоков в условиях встречного движения определяет высокую эффективность улавливания мелкодисперсной фракции.

Применение вихревого противоточного пылеуловителя на второй ступени в условиях меньшей пылевой нагрузки, в том числе по крупной фракции после циклона разгрузителя, обеспечивает высокую эффективность доочистки воздуха при небольшом общем гидравлическом сопротивлении системы. Для вихревых противоточных пылеуловителей оптимальная плановая скорость находится в интервале 5÷7 м/с [3, 6].

Для снижения гидравлического сопротивления предусмотрена последовательная компоновка аппаратов в условиях, когда выходящий из циклона газ перераспределяется между периферийным и центральным входными патрубками вихревого противоточного пылеуловителя в соответствии с принятой кратностью расходов посредствам участка воздуховода, соединяющего выхлопную трубу циклона с периферийным и центральным входными патрубками вихревого противоточного пылеуловителя.

Проведен комплекс экспериментальных исследований эффективности улавливания и гидравлического сопротивления двухступенчатой системы пылеулавливания циклон – вихревой противоточный пылеуловитель по выбранному плану 3^2 двухфакторного эксперимента [9-10]. Эксперименты проведены при варьировании двух режимных параметров: общего объемного расхода воздуха со значениями Q_0=280 м^3/ч; 330 м^3/ч; 380 м^3/ч и кратности расходов (k), определяемой как отношение объемного расхода воздуха, подаваемого через периферийный входной патрубок вихревого противоточного пылеуловителя к общему объемному расходу воздуха через систему, при значениях k= 0,4; 0,6; 0,8. При этом выполнено обезразмеривание параметра общего объемного расхода воздуха и получен относительный объемный расход воздуха ($Q_0/Q_{расч}$), определяемый как отношение общего объемного расхода воздуха к расчетной величине общего объемного расхода воздуха, которая составляет $Q_{расч}$= 330 м^3/ч со значениями $Q_0/Q_{расч}$= 0,85; 1; 1,15.

Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что гидравлическое сопротивление двухступенчатой системы пылеулавливания циклон-вихревой противоточный пылеуловитель зависит от кратности расходов k и относительного объемного расхода воздуха ($Q_0/Q_{расч}$). На рисунке 1 приведены зависимости гидравлического сопротивления двухступенчатой системы пылеулавливания циклон-вихревой противоточный пылеуловитель от кратности расходов k при общем объёмном расходе воздуха Q_0=280 м^3/ч. Следует отметить, что гидравлическое сопротивление циклона не зависит от кратности расходов. Это объясняется тем, что весь запыленный воздух не разделяясь на потоки подается в циклон. В то же время гидравлическое сопротивление вихревого противоточного пылеуловителя и воздуховода, соединяющего его с циклоном, зависит от кратности расходов (рисунок 1). При кратности расходов k=0,45 - 0,7 гидравлическое сопротивление вихревого противоточного

пылеуловителя, а также двухступенчатой системы наименьшее и составляет 1500 - 1750 Па при общем расходе воздуха Q_0=280 м^3/ч.

Проведены экспериментальные исследования по улавливанию мучной пыли (муки пшеничной) в лабораторной установке. Получены зависимости эффективности улавливания мучной пыли в двухступенчатой системе пылеулавливания циклон-вихревой противоточный пылеуловитель от кратности расходов k при общем объемном расходе воздуха Q_0=280 м^3/ч (рисунок 2). Из анализа полученных зависимостей следует, что при постоянном общем объемном расходе воздуха Q_0=280 м^3/ч наибольшая эффективность улавливания мучной пыли достигается при кратности расходов k=0,6-0,75 (рисунок 2). Такой характер изменения эффективности улавливания подтверждается и при других расходах воздуха.

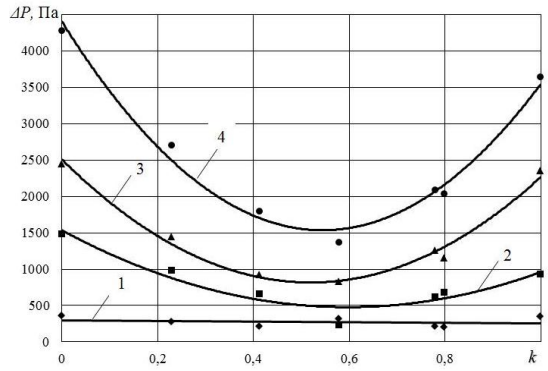


Рисунок 1 — Зависимости гидравлического сопротивления двухступенчатой системы пылеулавливания циклон-вихревой противоточный пылеуловитель от кратности расходов k при общем объёмном расходе воздуха Q_0=280 м^3/ч.
1 – циклон; 2 – воздуховод, соединяющий циклон-вихревой противоточный пылеуловитель;
3 – вихревой противоточный пылеуловитель;
4 – двухступенчатая система пылеулавливания

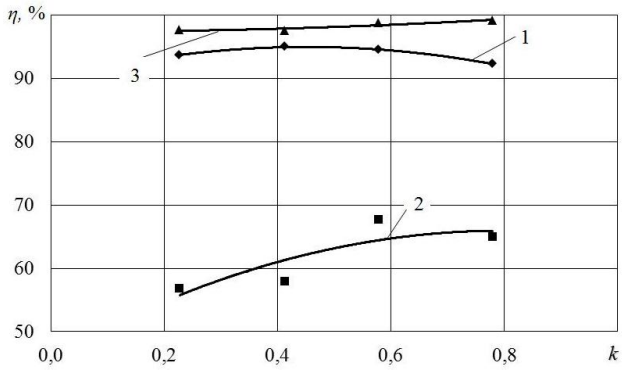


Рисунок 2 — Зависимости эффективности улавливания мучной пыли в двухступенчатой системе пылеулавливания циклон-вихревой противоточный пылеуловитель от кратности расходов k при общем объемном расходе воздуха Q_0=280 м^3/ч.
1 –циклон; 2 – вихревой противоточный пылеуловитель;
3 – двухступенчатая система пылеулавливания

В результате обработки экспериментальных данных получены зависимости для расчета общего гидравлического сопротивления и эффективности улавливания мучной пыли в двухступенчатой системе пылеулавливания циклон-вихревой противоточный пылеуловитель от кратности расходов и относительного объемного расхода воздуха:

$$\Delta P_0 = 6860 - 874{,}2\left(\frac{Q_0}{Q_{\text{расч}}}\right) - 24224k + 2483\left(\frac{Q_0}{Q_{\text{расч}}}\right)^2 + 1407\left(\frac{Q_0}{Q_{\text{расч}}}\right)k + 19804k^2. \quad (1)$$

$$\eta_0 = 79{,}96 + 28{,}87\left(\frac{Q_0}{Q_{\text{расч}}}\right) + 15{,}25k - 11{,}85\left(\frac{Q_0}{Q_{\text{расч}}}\right)^2 - 10{,}83\left(\frac{Q_0}{Q_{\text{расч}}}\right)\cdot k - 2{,}92\,k^2 \quad (2)$$

Выводы

В работе разработана и создана лабораторная установка двухступенчатой системы пылеулавливания циклон-вихревой противоточный пылеуловитель и получены новые экспериментальные данные по гидравлическому сопротивлению и эффективности улавливания мучной пыли (муки пшеничной). В результате обработки эксперимента получены зависимости для расчета общего гидравлического сопротивления и эффективности улавливания мучной пыли в двухступенчатой системе пылеулавливания от кратности расходов и относительного объемного расхода воздуха.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Штокман Е. А. Вентиляция, кондиционирование и очистка воздуха на предприятиях пищевой промышленности. М. АСВ, 2001.– 354 с.

2. Николаева Л. А. Очистка газовых выбросов предприятий химической промышленности карбонатным шламом / Л. А. Николаева, А. Н. Хуснутдинов // Экология и промышленность России. – 2018. - №8. – С. 14 – 18.

3. Акулич П. В., Акулич А. В. Конвективные сушильные установки: методы и примеры расчета: учебное пособие для студентов учреждений высшего образования по энергетическим и технологическим специальностям / П.В.Акулич, А.В.Акулич. – Минск: Вышэйшая школа, 2019. – 376 с.

4. Акулич А. В., Лустенков В. М. Новые высокоэффективные способы и пылеулавливающее оборудование на основе взаимодействующих вихревых потоков в пищевой промышленности. Сборник материалов научно-практической конференции “Инновационные решения проблем экономики знаний Беларуси и Казахстана” (13 октября 2016 года) / БНТУ, Минск, 2016., С.150–151.

5. Studies on the Hydrodynamics of the Combined Dust Collector on the Basis of Vortex Flows and Outer Filtering and the Development of the Effective Methods of Cleaning Gases from Solid Particles / Alexandr V. Akulich, Viktor M. Lustenkov, Viachaslau A. Sharshunou, Alexandr A. Akulich // «Food Science, Engineering and Technology – 2016»: Scientific Works of University of Food Technologies Proceedings of the 63rd Scientific Conference with Internacional Participation: Volume 63, Issue 1, 283–288.

6. Сажин Б. С. Вихревые пылеуловители / Б.С. Сажин , Л.И. Гудим. – Москва: Химия, 1995. – 144 с.

7. Акулич А. В. Способы и конструкции пылеулавливающих аппаратов, применяемые в теплотехнологических установках /А.В.Акулич, В.М.Лустенков, В.М.Акулич/ Международная конференция «Образование, наука и производство в XXI веке: современные тенденции развития», Могилев, Белорусско-Российский университет, 11-12 ноября 2021/ М-во образования Респ. Беларусь, М-во науки и высшего образования Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: М.Е.Лустенков (гл. ред.) [и др.].– Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2021. – С.108.

8. Акулич А. В. Обоснование и разработка схемы двухступенчатой системы пылеулавливания в теплотехнологических установках / А.В. Акулич, В.М. Лустенков, В.М. Акулич, К.Т. Динков // Техника и технология пищевых производств: материалы XIV Междунар. научн.-техн. конф. / Могилев, 21–22 апреля 2022 г. / В 2-х т. / Учреждение образования «Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий»; редкол.: А.В. Акулич (отв. ред.) [и др.]. – Могилев: БГУТ, 2022. – Т.2. – С.7-8.

9. Акулич А. В., Лустенков В. М. Определение гидравлического сопротивления двухступенчатой системы пылеулавливания циклон-вихревой противоточный пылеуловитель /Инновации в АПК – как стратегические приоритеты технологического суверенитета: Национал. науч.-практ. конф. с Междунар. участием: Ассоциация «ТППП АПК»,2022, Воронеж, 30 ноября 2022 г. – С. 56-62.

10. Акулич А. В. Исследование гидравлического сопротивления двухступенчатой системы пылеулавливания циклон-вихревой противоточный пылеуловитель и выбор параметров для планирования эксперимента / А.В. Акулич, В.М. Лустенков, С.С. Ермоленко, Н.С. Порошков // Техника и технология пищевых производств: материалы XV Юбилейной Междунар. научн.-техн. конф. / Могилев, 19–20 апреля 2023 г. / В 2-х т. / Учреждение образования «Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий»; редкол.: А.В. Акулич (отв. ред.) [и др.]. – Могилев: БГУТ, 2023. – Т.2. – С.4-5.

УДК 628.349.094.3 DOI: 10.37816/eeste-2024-1-168-171

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФЕРРАТОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ОТ ФАРМАЦЕВТИЧЕСКИХ ПРЕПАРАТОВ
USE OF FERRATES FOR PURIFICATION OF WASTEWATER FROM PHARMACEUTICALS

Екатерина Александровна Аурова, Лада Даниловна Илюшина, Елена Юрьевна Квиткова
Ekaterina A. Aurova, Lada D. Ilyushina, Elena Yu. Kvitkova

Ивановский государственный химико-технологический университет, Россия, Иваново
Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Russia, Ivanovo
(e-mail:ekaterinaaurova@yandex.ru, fritter_i@mail.ru, bur_1981@mail.ru)

Аннотация: Изучен процесс окислительной деструкции ибупрофена под действием раствора ферратов. Определена степень деструкции ибупрофена при добавлении различных аликвот феррата натрия, произведена оценка качественного и количественного состава продуктов разложения ибупрофена.

Abstract: The process of oxidative destruction of ibuprofen under the influence of a ferrate solution has been studied. The degree of destruction of ibuprofen with the addition of various aliquots of sodium ferrate was determined, and the qualitative and quantitative composition of the decomposition products of ibuprofen was assessed.

Ключевые слова: ибупрофен, ферраты, степень деструкции, очистка воды.

Keywords: ibuprofen, ferrates, degree of destruction, water purification.

В XXI веке производство фармацевтических препаратов (ФП) растет усиленными темпами, по разным источникам общее потребление ФП в мире уже достигло 3 млн т в год. Глобальное использование ФП приводит к загрязнению вод ксенобиотическими соединениями с широким спектром биологической активности, так как сточные воды фармацевтических производств могут содержать более 100 различных фармацевтических соединений. Концентрация фармацевтических субстанций в стоках нередко достигает сотен и даже тысяч мг/м^3. Трансформация некоторых ФП, содержащихся в сточных водах, может привести к появлению соединений, проявляющих большую токсичность и повышенную стойкость, чем исходные [1-3]. Поскольку существующие очистные сооружения как правило не предназначены для удаления ФП из воды и имеют низкую степень очистки по ряду специфических компонентов, необходима разработка новых современных и эффективных систем очистки.

В последнее время всё большую популярность приобретают окислительные методы очистки. Весьма перспективными реагентами для обработки воды являются ферраты (VI) щелочных металлов, обладающие многофункциональным действием. Ферраты (VI) являются наиболее мощными из известных окислителей и способны разлагать многие токсичные химические вещества до малотоксичных продуктов (окисляющее действие), а также вызывать гибель микроорганизмов (дезинфицирующее действие). Продуктом разложения самих ферратов в растворе является гидроксид железа, то есть малотоксичный продукт. Кроме того, гидроксид железа выделяется в виде коллоидных агрегатов с очень развитой поверхностью, которые эффективно адсорбируют ионы тяжелых металлов, радионуклиды, частицы суспензий и органические остатки, обеспечивая дополнительную очистку воды путем коагуляции загрязнителей (коагулирующее действие) [4].

В данной работе представлены результаты обработки модельных водных растворов ибупрофена (с начальной концентрацией $C_н$ в диапазоне 8,6-42,8 мг/л) путем добавления аликвоты раствора феррата натрия. Получение феррата (концентрация FeO_4^{2-} составляла 1 г/л)

осуществляли химическим способом – растворением $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ в щелочном растворе NaClO с последующим нагреванием полученной смеси [5,6]. Время обработки проб варьировалось от 1 до 30 минут.

Для определения концентрации ибупрофена и продуктов его деструкции в растворе после обработки ферратом натрия были использованы метод газовой хроматографии (хроматограф «Хроматэк-5000» с пламенно-ионизационным детектором), фотометрический метод (спектрофотометр «UNICO-2804») и хромато-масс-спектрометрия (газовый хроматомасс-спектрометр «Shimadzu GCMS-QP 2010 Ultra»).

Экспериментально установлено, что при добавлении к модельному раствору ибупрофена ($C_н$ = 21,4 мг/л) раствора феррата в стехиометрическом соотношении (ИБ:Ф = 7:1) степень разложения ибупрофена достигала 99 % и выше при времени обработки раствора 15 минут. При уменьшении объема аликвоты феррата (ИБ:Ф = 100:1 или 1/16 от стехиометрического) степень разложения по-прежнему была высока (~ 97 %).

Высокая эффективность деструкции ибупрофена подтверждается результатами хроматографического анализа раствора ибупрофена. Пример хроматограммы для раствора ибупрофена с начальной концентрацией 21,4 мг/л приведен на рисунке 1 – в исходном модельном растворе наблюдался отчетливый пик исследуемого вещества (линия 1), а после обработки ферратом - пик отсутствует (линия 2).

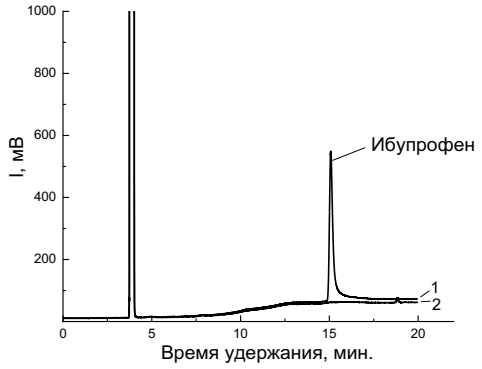


Рисунок 1 — Хроматограммы растворов ибупрофена (Сн = 21,4 мг/л):
1 – исходный модельный раствор, 2 – раствор после обработки ферратом.

В ходе проведения экспериментов выполнялся контроль величины pH обработанных растворов. На рис. 2 представлена зависимость pH раствора ибупрофена с начальной концентрацией 21,4 мг/л от времени его обработки ферратом. Видно, что после добавления феррата растворы имели щелочную среду (pH поднималась до 10,2-11,3), причем чем больше был объем добавляемого феррата, тем выше было значение pH у обработанных растворов.

Защелачивание раствора происходит в следствие разложения Fe(VI) в воде с образованием гидроксид-анионов:

$$2\ FeO_4^{2-} + 5H_2O \rightarrow 2Fe^{3+} + 3/2\ O_2 + 10\ OH^-.$$

Одним из возможных продуктов окисления органических соединений могут быть слабые органические кислоты. Действительно, при обработке ибупрофена с начальной концентрацией 8,6 мг/л в растворе были обнаружены карбоновые кислоты, кинетика образования которых приведена на рисунке 3. В максимуме их выход составляет 8 % от начального содержания «углерода» системы, следовательно есть другие неидентифицированные продукты окисления ибупрофена.

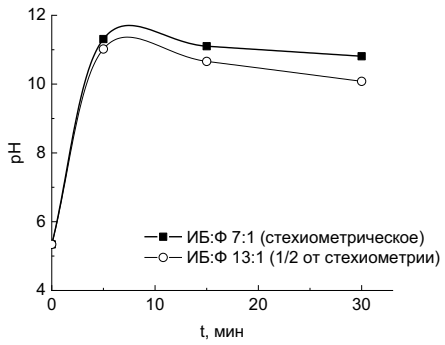


Рисунок 2 — Изменение величины pH обработанных модельных растворов (Сн = 21,4 мг/л).

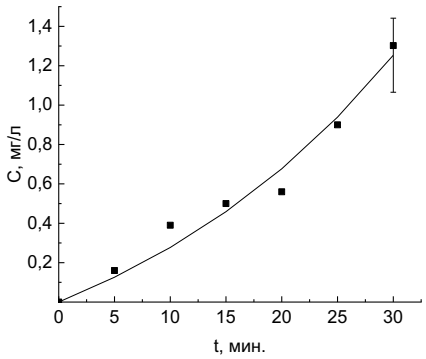
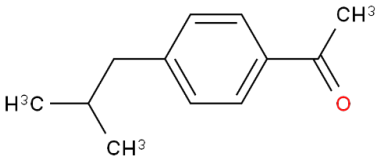
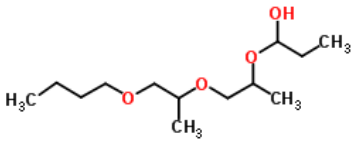
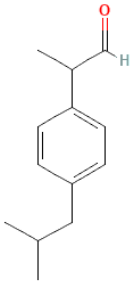


Рисунок 3 — Изменение концентрации карбоновых кислот в обработанных растворах ибупрофена ($C_н$ = 8,6 мг/л)

Для определения качественного состава образующихся продуктов деструкции ибупрофена под действием феррата натрия были проведены исследования с использованием хромато-масс-спектрометрии. Продукты деструкции ибупрофена, определенные на основании анализа хромато-масс спектров, представлены в таблице 1.

Таблица 1 — Продукты окислительной деструкции ибупрофена

Название	Формула
4'-(2-метилпропил)ацетофенон	
Пропанол, [2-(2-бутоксиметилэтокси)метилэтокси]	
2- (4-изобутилфенил) пропионовый альдегид	

Отметим, что идентифицированный 4'-(2-метилпропил)ацетофенон является продуктом разложения ибупрофена в таблетках [7].

Выводы

Установлено, что процесс деструкции ибупрофена под действием феррата протекает эффективно (степень разложения достигает 99 % и выше), что свидетельствует о возможности использования раствора феррата для очистки сточных вод фармацевтических производств.

Исследование проведено с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием ИГХТУ (при поддержке Минобрнауки России, соглашение № 075-15-2021-671). Работа выполнялась в рамках государственного задания на выполнение НИР: тема № FZZW-2023-0010.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kujawa-Roeleveld, K. Training material. Pharmaceutical compounds in environment. Removal of pharmaceuticals from concentrated wastewater streams in source oriented sanitation? / K. Kujawa-Roeleveld // Sustainable Water Management in the City of the Future. - 2011. – С. 1-69.
2. Лыков, И. Н. Фармацевтическое загрязнение окружающей среды / И. Н. Лыков // Проблемы региональной экологии. 2020. № 3. С. 23-27.
3. Cardoso O., Porcher J. M., Sanchez W. Factory-discharged pharmaceuticals could be a relevant source of aquatic environment contamination: review of evidence and need for knowledge // Chemosphere. 2014. V. 115. P. 20—30.
4. Хенце М. Очистка сточных вод. Перевод с английского. Калюжный С.В., ред. М.: Мир; 2006.
5. Jiang J. Q., Lloyd B., Grigore L. Preparation and evaluation of potassium ferrate as an oxidant and coagulant for potable water treatment //Environmental Engineering Science. 2001. Т. 18. №. 5. С. 323-328.
6. El Maghraoui A. et al. Synthesis and characterization of ferrate (VI) alkali metal by wet method //Int. J. Mod. Eng. Res. 2012. Т. 2. С. 4521-4523.
7. Химическая сеть Guidechem. [Электронно] URL.: 4'- (2-метилпропил) ацетофенон 38861-78-8 wiki (guidechem.com) (Дата обращения 26.10.2023).

EFFECTS OF MICROBIAL INOCULUM ON MICROBIAL COMMUNITY AND ENZYME ACTIVITY INVOLVED IN NITROGEN-SULFUR METABOLISM DURING SEWAGE SLUDGE COMPOSTING
ВЛИЯНИЕ МИКРОБНОГО ИНОКУЛЯМА НА МИКРОБНОЕ СООБЩЕСТВО И АКТИВНОСТЬ ФЕРМЕНТОВ, УЧАСТВУЮЩИХ В АЗОТНО-СЕРНОМ ОБМЕНЕ ПРИ КОМПОСТИРОВАНИИ ОСАДКОВ СТОЧНЫХ ВОД

Tingting Hou*, Yujie Zhou, Xu Cao*, Weiguang Li**, Shumei Zhang*, Yi Zhao**, Li Chen**, Qi An*, Liqiang Meng***

** Institute of Microbiology, Heilongjiang Academy of Sciences, China, Harbin*
*** School of Environment, Harbin Institute of Technology, China, Harbin*
(email: mengliqiang83420@163.com)

Abstract : The purpose of this study was to access the effects of thermotolerant nitrifying microorganisms and sulfur-oxidizing bacteria on microbial community and enzyme activity involved in nitrogen-sulfur metabolism during laboratory-scale sewage sludge (SS) composting, and to do a microbial-environmental factor association analysis to promote composting key species for nitrogen-sulfur transformation in the body. The microbial community structure and the activities variation of six key enzyme involved were detected. The microbial inocula added had little impact on the diversity of the microbial community but changed its succession direction, and the abundance of Actinobacteria was decreased obviously of inoculation treatment (TR). The three dominant genera and indicator species in TR were significantly correlated with the conversion of nitrogen and sulfur. The addition of microbial inocula promoted the conversion of nitrogen and sulfur in SS compost, and increased the activities of the key enzymes and the microbial genera involved in nitrogen-sulfur conversion. In other words, the nitrification and sulfur oxidation were enhanced simultaneously in the later stage of composting in TR.

Аннотация: Целью данного исследования было изучение влияния термотолерантных нитрифицирующих микроорганизмов и сероокисляющих бактерий на микробное сообщество и активность ферментов, участвующих в азотно-серном обмене при компостировании осадка сточных вод (SS) в лабораторных масштабах, а также ассоциативный анализ микробно-

экологического фактора для содействия компостированию ключевых видов для трансформации азота и серы в организме. Выявлена структура микробного сообщества и вариация активности шести ключевых ферментов. Добавленный микробный инокулят мало повлиял на разнообразие микробного сообщества, но изменил направление его сукцессии, а численность актинобактерий, очевидно, снизилась в результате инокуляционной обработки (ИО). Три доминирующих рода и виды-индикаторы в ИО достоверно коррелировали с конверсией азота и серы. Добавление микробного инокулята способствовало превращению азота и серы в компосте SS и повышало активность ключевых ферментов и родов микробов, участвующих в превращении азота и серы. Другими словами, нитрификация и окисление серы усиливались одновременно на более поздней стадии компостирования в ИО.

Keywords: Sewage sludge; composting; microbial community structure; nitrogen-sulfur metabolism ; microbial inocula.

1. Introduction

Sewage sludge (SS) is the suspended matter precipitated during the sewage treatment process. In China, with the continuous improvement of urbanization and the rapid development of the sewage treatment industry, the output of SS would reach 60-90 million tons (moisture content more than 80%) in 2020 [7]. SS contains a large amount of nutrients such as organic matter, nitrogen, phosphorus and sulfur, and so has great fertilizer value [32, 35]. Aerobic composting is one of the effective methods for treating SS due to its advantages of simple operation and low construction and operation cost, and its final product can be used as soil conditioner and high-quality fertilizers [14]. However, its odor problem has gradually become a major challenge for the development of compost during the vigorous biodegradation process [1].

Ammonia (NH_3) and hydrogen sulfide (H_2S) had been confirmed to be the two main gases of compost odor [20, 49]. NH_3 is mainly produced from ammonia nitrogen produced by the biodegradation of nitrogen-containing organic matter. Ammonia emission not only makes the composting environment foul, but also reduces the fertilizer value of composting products. In the early stage of composting, the vigorous activity of microorganisms consumes a lot of oxygen, and a lot of anoxic or anaerobic areas are emerged inside the composting. In this environment, sulfate-reducing bacteria will reduce sulfate to H_2S, and the incomplete biodegradation of organic matter containing sulfur also accelerate the formation of H_2S [48]. Although the release of H_2S is not as high as that of NH_3, its odor threshold is usually low [18]. A low odor threshold means that the contribution rate of H_2S is high, and human health is threatened.

Aerobic composting relies on the catabolic process of microorganisms. The microbial community in the compost is the key to affecting the quality of the compost. In the composting process, the indigenous microbial community plays a major role in converting of degradable organic matter into humus-like products. However, insufficient numbers of indigenous microorganisms or poor biodegradation often results in unsatisfactory compost quality [8]. The addition of exogenous microorganisms is thought to promote the biodegradation of organic matter, reduce composting cycle, and imcrease the composting efficiency [15]. Adding exogenous microorganisms is one of the important ways to control the odor of SS composting. Therefore, it is necessary to explore the effect of the dosage of the two strains on the structure of microbial community during the SS composting process.

It has been extensively reported that inoculation with exogenous nitrifying bacteria is a feasible method to improve the nitrification, at the same time reduce nitrogen loss and improve compost quality [21, 34]. Nevertheless, most of the nitrifying bacteria reported were not resistant to high temperatures (above 50 ℃), the effect of reducing ammonia volatilization is not obvious in thermophilic phase [5, 9, 25, 37]. Sulfide oxidizing bacteria (SOB) use excess low-valence state sulfur in compost as electron donors for oxidation reactions to reduce H_2S emissions [6]. Application of SOB has been carried out to effectively control H_2S odors in biofilter treatment. A strain of *Acidithiobacillus thiooxidans* applied to a two-phase bioreactor was reported to remove more than 97% of the inlet H_2S odors [45], and it was found that SOB loaded waste carbon biofilter have an

efficient treatment of H_2S (over 90%) [3]. However, the effects of SOB inoculants on the control of H_2S odors in composting system have not been studied.

In nitrification, ammonia is oxidized to hydroxylamine (NH_2OH) under the action of Ammonia monooxygenase (AMO), hydroxylamine is further oxidized to nitrite under the action of hydroxylamine oxidase (HAO), and then nitrite is oxidized to nitrate under the action of nitrite oxidoreductase (NXR). In the metabolic pathway of sulfur oxidation, reducing sulfide (H_2S, HS^-, S^-) can be catalyzed and oxidized by sulfide quinone oxidoreductase (SQR) enzyme to produce polysulfide (RS_nH), which is generated by spontaneous reaction (GSSH), then oxidized by sulfite dioxygenase (SDO) to SO_3^{2-}, and finally oxidized by sulfite oxidoreductase (SOR) to sulfate (SO_4^{2-}).

Considering the types of inoculants, this paper focuses on six key enzyme activities in nitrification and sulfur oxidation reactions. Therefore, it is essential to explore the influence of two types of microorganisms on the biochemical reaction and metabolism of nitrogen and sulfur in the process of SS composting.

High-throughput sequencing technology is currently widely used in the analysis of microbial community in environmental samples. In this study, effect analysis was used for high-throughput sequencing technology of adding thermotolerant nitrifying microorganisms (TNM) and thermotolerant sulfur-oxidizing bacteria（TSOB） on the diversity, structural composition and dynamic evolution of microbial communities in SS composting.

This technology is also used to find out the different species, and the correlation analysis of microbial environmental factors, which is carried out to find out the microbial community that is significantly related to the changes of key physicochemical indicators, and further obtain the key species that promote the transformation of nitrogen and sulfur in the heap. Enzyme activity is a key indicator of microbial metabolic reactions, and can reflect the metabolic situation of microorganisms in SS composting.

So the aim of this experiment is (1) analyze the effect of adding thermotolerant nitrifying microorganisms (TNM) and thermotolerant sulfur-oxidizing bacteria（TSOB） on the diversity, structural composition, and dynamic evolution of microbial communities in SS composting. (2) investigate the six key enzymes activity, and the correlation between the microbial community and the enzyme activities.

2. Materials and Methods

2.1. Composting materials and reactors

The SS & rice husks used during the composting process were collected from a SS composting plant in Heilongjiang, China. The physicochemical properties of the two materials are listed in Table 1.

Before the composting is started, the sludge and rice husks are thoroughly mixed with a dry weight ratio of 3:1, and adjusted the water content of the compost to about 60%. All sludge composting experiments lasted 20 days, with samples collected on Day 0, 3, 6, 10, 15, and 20.

The composting device used in this study includes composting reactors, a water bath insulation system and a gas collection system whose structure was described in our earlier report [33]. The composting samples were stored at -20°C by high-throughput sequencing and enzyme activity assays.

Table 1. Physicochemical characteristics of SS and rice husk

Parameter	SS	Rice husk
Moisture content (%)	72.16±0.07	5.73±0.03
pH value	3.64±0.02	5.36±0.01
Volatile organic matter (%)	46.88	81.59
Total organic carbon (%)	21.02±0.04	35.37±0.17
Total organic nitrogen (%)	3.50±0.02	1.01±0.01
Total organic sulfur (%)	1.37±0.01	0.56±0.16
C/N	6.01±0.04	35.02±0.18

2.2. Sources and experimental conditions of complex microbial communities

The CMC used in the composting experiments are composed of TNM and TSOB which were screened from the co-composted samples of SS and spent mushroom substrate [19]. The TNM are composed of one *Streptomyces*, *one Gordonia*, and one *Brevibacillus* [6, 44]. A large number of preliminary experiments have proved that the optimal adding conditions of microbial agents are: the ratio of high-temperature resistant nitrifying bacteria to sulfur-oxidizing bacteria is 1.3:1, the adding time is 55h, and the total adding amount is 4.03%. Under this condition, the effects of microbial inoculum inoculation on microbial community structure and nitrogen and sulfur transformation of compost were investigated.

2.3. DNA extraction, polymerase chain reaction (PCR), high-throughput sequencing of Illumina MiSeq

All collected composting samples were sent to Biomedical bio-technology Co., Ltd. (Shanghai, China) on the Illumina MiSeq (2 × 300 bp paired-end) Platform for high-throughput sequencing. Total DNA from the microbial community was extracted following the instructions of the E.Z.N.A.® soil DNA kit (Omega Bio-tek, Norcross, GA, U.S.), and by 1% agarose gel electrophoresis checked the quality of the extracted DNA and used NanoDrop2000 spectrophotometer to determined DNA concentration and purity.

The bacterial 16SrRNA gene V3-V4 variable region was PCR amplified using primer sequences 338F and 806R. The amplification program was as follows: pre-denaturation at 95°C for 3 min, 27 cycles (denaturation 30s at 95°C, annealing 30s at 55°C, extension 45s at 72°C), followed by stable extension at 72°C for 10 min, and a final at 10°C store. Each sample has 3 replicates per.

2.4. Determination of enzyme activity

The compost sample enzyme solution was ultrasonically extracted in the light of the relevant literature [13]. The approximate steps are as follows: mix the compost sample with 0.05 mol/L Tris buffer at a mass ratio of 1:10, ultrasonically crush it in an ice bath (100 W for 3 s, 10 s interval, 30 cycles), and the crushed mixture is 14,000 Centrifuge at rpm and 4℃ for 20 minutes, and take the supernatant to pass through a 0.22 μm filter to obtain the enzymatic extract. AMO, NXR, HAO key conversion enzymes for nitrification and sulfur oxidation reaction for SQR. The activities ELISA kits (LMAI Bio) detected SOR and SDO were by for six enzymes, respectively.

2.5. Statistical analysis

Microsoft Office Excel 2010 was used to organized all data. Follow-up data analysis was performed through the cloud analysis platform (QIIME2 process) (cloud.majorbio.com) of Shanghai Meiji Biomedical Technology Co., Ltd. Using Gephi 0.9.5, the co-occurrence network diagram of microbial genera was made according to Pearson correlation analysis.

3. Result and discussion

3.1. SS compost sample

The dilution curves of two groups of compost samples at different periods are shown in Fig. 1 (Supplementary information Figure S1). As the number of sequencing increases, the number of species observed in each sample has flattened, indicating that the sequencing volume has basically covered most of the species in the sample, the sequencing depth is sufficient, and subsequent data analysis is effective. The Fig. 1 also shows that the number of species in the samples on Day 0 of composting is the largest, and as the composting process progresses, the number of species in both groups of composts decreases, which may be because more mesophilic microorganisms die during the thermophilic phase, resulting in a marked decline in the number of species. Studies have shown that high temperature conditions are a more restricted ecological niche for the composting process, which ultimately leads to a more homogeneous and more specific bacterial community compared to the starting composting material [4].

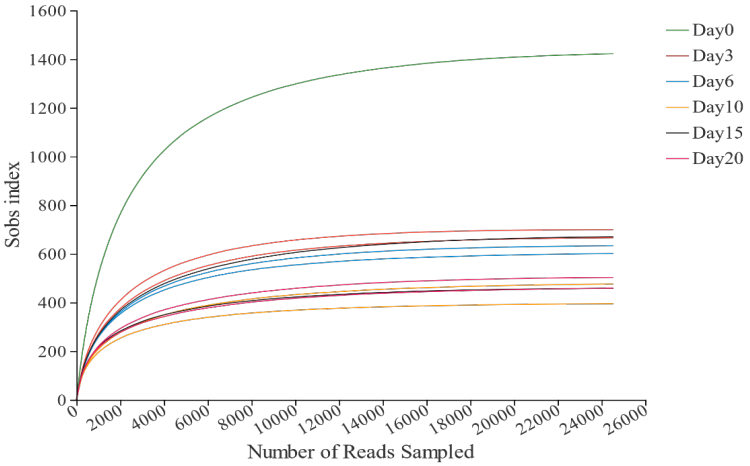


Figure 1 – Dilution curves of SS samples

3.2. Alpha-diversity of microbial community

In the Alpha diversity index of microbial community, the Chao index and the sobs index can reflect microbial community richness, the Simpson index and the Shannon index reflect microbial community diversity, and the Shannoneven index and the Simpsoneven index reflect the evenness of the community. Community diversity is the combined result of the richness and evenness. In the process of SS composting, the changes of microbial Alpha diversity index of in compost samples at different periods are shown in Table 2.

Table 2. Alpha diversity index of sludge compost samples in different periods

Sample	Sobs	Chao	Shannon	Simpson	Shannoneven	Simpsoneven
CT_Day0	1422	.12	6.447	0.0042	0.8881	0.1657
C_Day3	699	699.00	4.894	0.0473	0.7472	0.0303
T_Day3	666	667.49	4.781	0.0491	0.7354	0.0306
C_Day6	633	634.49	4.572	0.0624	0.7088	0.0253
T_Day6	601	603.78	4.765	0.0375	0.7447	0.0443
C_Day10	395	397.13	4.613	0.0229	0.7715	0.1108
T_Day10	476	479.23	4.693	0.0219	0.7613	0.0958
C_Day15	670	672.19	5.068	0.0161	0.7789	0.0929
T_Day15	458	459.31	4.812	0.0169	0.7855	0.1291
C_Day20	503	504.94	4.818	0.0175	0.7746	0.1135
T_Day20	459	465.73	4.896	0.0138	0.7989	0.1582

Note:“T” Begin with the experimental group samples.

As composting begins, the alpha diversity index of both treatments samples decreased, indicating that the richness and diversity of bacterial communities decreased at both treatments. The Chao index and Sobs index of the experimental group (TR) were less than those of the control treatment (CK) except on Day 10, while the Shannoneven index and Simpsoneven index of the TR were higher than those of the CK. While the TR had lower community richness and higher community uniformity, and the above differences were not significant.

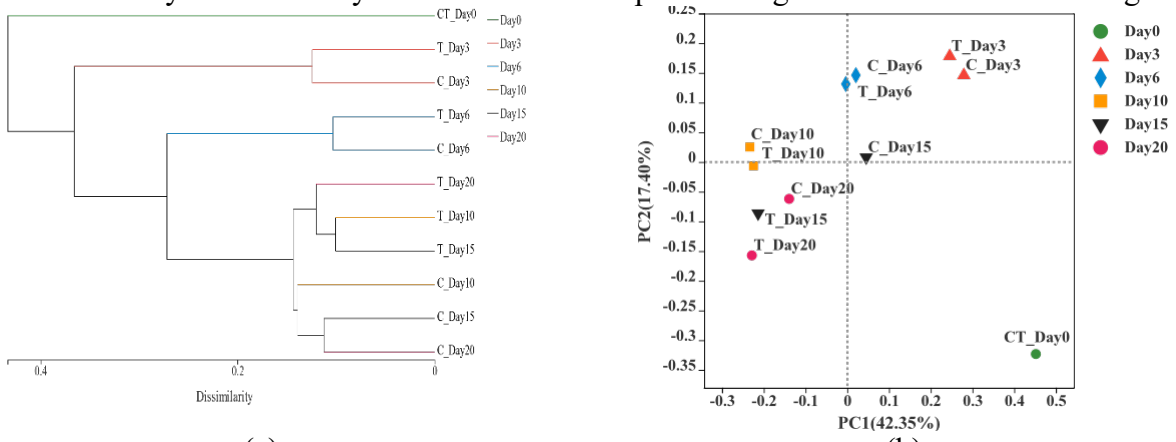
Similar results were reported by [12] that added *Streptomyces griseorubens JSD-1* to the co-composting process of pig manure and rice husks. The results display that the Chao1 index of the TR was significantly lower than that of the CK during the thermophilic phase ($P<0.05$), the Simpson and Chao1 indices of the TR in the final product were obviously lower than those in the CK ($P<0.05$). These results indicate that the bacterial diversity in the compost added with JSD-1 is lower, and it is speculated that the higher temperature caused by the dosing of the agent has a strong driving effect on the formation of bacterial community caused by the dosing of the agent, so that the bacterial community structure in the external bacterial agent heap is more uniform.

3.3. Beta-diversity of microbial community

The sample hierarchical clustering analysis is based on the beta diversity distance matrix to carry out hierarchical clustering (Hierarchical clustering) analysis, using the UPGMA algorithm to build a tree structure, and visualize the degree of difference in community distribution in different environmental samples.

Using the Bray-Curtis distance algorithm, the results of the hierarchical cluster analysis of the two groups of compost samples in the genus level were obtained in Fig. 2a. From the Fig. it can be seen that from Day 0 to Day 6 of composting, the distribution of sample communities at the same sampling time is highly similar, showing the community succession process of microorganisms in the compost over time. After Day 6, the community distribution of the same treatment groups has a higher similar. This may be because the addition of high-temperature-resistant TNM and TSOB changed the succession direction of the microbial community in the heap, indicating that the external inoculants did have a significant influencing the distribution of indigenous microbial communities.

Principal coordinates analysis (PCoA analysis), can be used to study the similarity or difference in the composition of sample community, which is reflected in the sample distance in the Fig.2b There are four commonly used algorithms for PCoA, among which the unweighted unifrac algorithm considers species composition and evolutionary relationship. In this study, based on the unweighted unifrac algorithm, the microbial community structure changes of compost samples during different periods were analyzed. The analysis results of the samples at the genus level are shown in Fig. 2b.



(a) (b)

Figure 2 – Genus Level Sludge Compost Sample Hierarchical Clustering Tree(a) Genus-level PCoA analysis of sludge compost samples(b)

The first two main components explain 60% of the total variance. On Day 0 to Day 10 of SS, the colony structure of different composting stages was quite different, while the community structure of different treatments in the same period was similar. The colony structure of the samples on Day 10 to Day 20 of composting was similar. Studies have shown [38] that organic matter is converted into humus-like substances, and the rate of ammonia nitrogen conversion into nitrate nitrogen after the addition of microbial inoculants will proceed at different speeds but with similar mechanisms in the composting process. In addition, the extreme conditions (High temperature, alkalinity, etc.) during composting process cleared intolerant bacteria and enriched some tolerant bacteria, resulting in a similar community structure between the two treatments after composting.

3.4. Taxonomic composition of microbial communities during SS composting

After the high-throughput sequencing data obtained from the 11 compost samples were flattened, a total of 2850 amplicon sequence variants (ASVs) were counted, belonging to 35 phyla, 105 classes, 249 orders, 408 families, 802 genera and 1290 species. The community taxonomic composition of the samples in the CK and the TR in different composting periods is analyzed as follows.

The phylum-level composition of SS compost samples at different periods is shown of Fig. 3a (species with an abundance of less than 1% are classified as "others"). The top 6 phyla in species abundance are *Actinobacteriota, Proteobacteria, Firmicutes, Chloroflexi, Bacteroidota*, *Bacteroides* and *Gemmatimonadota*. [42] also reported similar microbial compositions in corn stover compost and

[22] in pig manure compost. The changes indicated the succession of its various functions of the microbial community, promoting the composting process, and the changes of bacterial abundance at different treatment phyla levels were similar. *Proteobacteria* was the most dominant group in the compost material on Day 0, followed by *Actinobacteria* and *Bacteroidetes*.

The abundance of *Proteobacteria* presents a trend of first decreasing and then gradually stabilizing with the progress of composting, and its abundance decreased from 42.96% to 12.44% (CK) and 13.56% (TR) respectively on Day 10 of composting. The stable period rose slightly to 13.83% (CK) and 16.35% (TR). The *Proteobacteria* contains a variety of bacteria associated with the global carbon, nitrogen and sulfur cycle [2], and the decrease in their abundance during composting may be due to the weakening of carbon, nitrogen and sulfur cycle transformations with the bulk degradation of organic matter.

The abundance of *Actinobacteriota* increased significantly during the composting process, and increased from the initial 10.98% to 46.24% (CK) and 41.24% (TR) at the end of the thermophilic phase, and the abundance of the CK did not change much in the stable period, the abundance of the TR decreased to 32.97%, and the abundance of *Actinobacteria* in the TR was always lower than that CK, with a significant difference. *Actinobacteria* mainly act on difficult-to-decompose organic matter and are the main bacterial community for degrading lignocellulose in aerobic composting [26]. Since the compost material had rice husks added as a conditioner, the increased abundance of *Actinobacteria* after the start of composting may indicate their degradation of rice husks.

The abundance of *Bacteroidota* showed a trend of first gradual decreased followed by rapid increased. In the thermophilic phase, its abundance decreased from the initial 14.64% to 0.60% (CK) and 0.64% (TR) respectively, and increased to 6.19% (CK) and 11.39% (TR) in the stable period. This trend is similar to that of [41], but different from that of [38]. In this study, the relative abundance of *Bacteroidetes* was close in the initial and thermophilic phase, and dominated in the stationary period, while the results of this study suggest that dominate of *Actinobacteria*.

The abundance of *Firmicutes* showed a current of first increasing and then decreasing. After the thermophilic phase, its abundance increased from 6.26% to 23.97% (CK) and 21.23% (TR), respectively, and decreased to 13.36% (CK) in the stable period and 13.93% (TR). *Firmicutes* account for a large proportion in the thermophilic phase of composting, with the ability to decompose hemicellulose, cellulose, and lignin [30]. Therefore, the *Firmicutes* for relative abundance is closely related to changes in organic matter. Both *Bacteroidetes* and *Firmicutes* in cellulose degradation and transformation play important roles [43]. Several studies have observed a switch between *Bacteroidetes* and *Firmicutes* in the composting process. *Firmicutes* predominate during the thermophilic phase, during which cellulose is hydrolyzed into sugars [24, 43]. The *Bacteroidota* dominates during the statsionary phase, during which sugars are converted into alcohols, carbon dioxide, and carboxylic acids.

The abundance of *Chloroflexi* was low in the compost mesophilic phase and the pre-thermophilic phase, and the proportion was higher in the late high temperature period to the decomposing period. Although most of *Chloroflexi* are facultative anaerobic bacteria, they do not produce oxygen and cannot fix nitrogen during photosynthesis. Some literatures point out that *Chloroflexi* existing in activated sludge are mainly aerobic heterotrophs. Carbohydrates are the substrate and have a significant positive correlation with Chemical Oxygen Demand (COD) removal in activated SS [46]. The abundance of *Gemmatimonadota* gradually increased from Day 6 of composting, and its abundance increased from the initial 0.95% to 6.29% (CK) and 8.09% (TR) at the end of composting. The abundance of *Gemmatimonadota* is related to the humidity of the environment, and it is easy to survive in a low-oxygen and low-humidity environment [13].

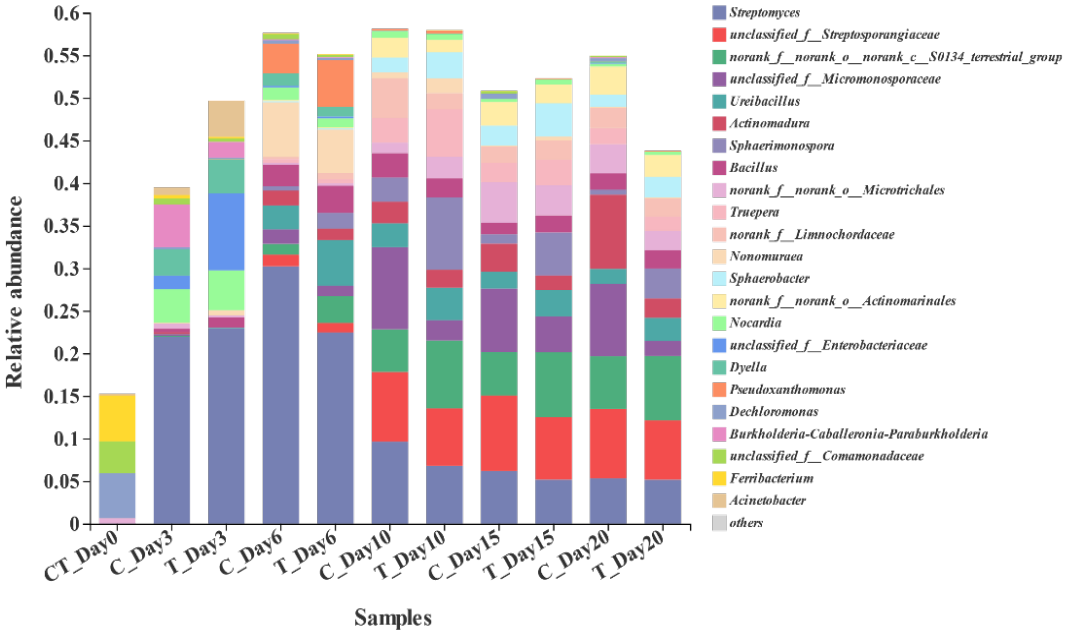
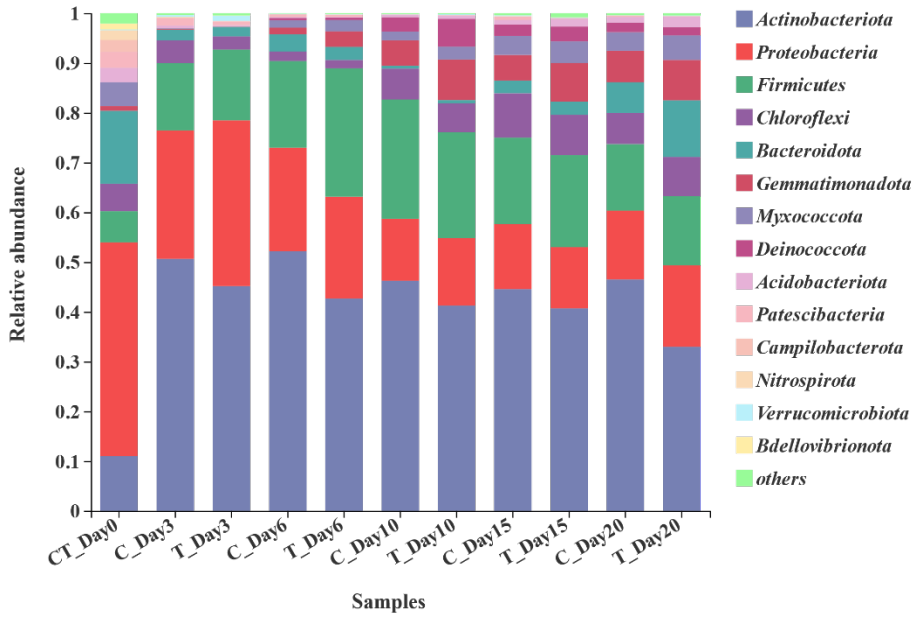


Figure 3 (a)



(b)

Figure 3 – The phylum-level (a) and genus-level (b) composition of microbial communities in sludge compost samples at different times

The genus-level composition of sludge compost samples at the genus level is shown of Fig. 3b (species with an abundance of less than 3% are classified as "others", not shown in the Fig.3a). As can be seen from the Fig.3b that the composition at the microbial genus level after the start of composting is significantly different from that of the original material. The composition of microbial genus in the early and late stages during composting changed greatly, while the genus-level composition in the microbial community decomposing stage was relatively small. The species and genus composition of the raw materials were relatively rich, among which *Dechloromonas, Ferribacterium* and *Comamonadaceae* accounted for a higher proportion. After composting started, the dominant genera for all samples were *Streptomyces, Streptos-porangiaceae, Micromonosporaceae, Ureibacillus, Actinomadura, Microtrichalesn S0134_terrestrial_group, Sphaerimonospora, Spore Bacillus,* and *Truepera. Streptomyces, Nocardia, Nonomuraea and Pseudoxanthomonas* were the dominant genera in the mesophilic phase and thermophilic phase.

Bacillus is a thermotolerant bacteria frequently detected in lignocellulosic composting systems, which promotes lignin degradation during composting and plays an important role in nitrogen fixation [10], and it has been reported that Bacillus strains contain strains Can mediate denitrification and sulfur oxidation [28, 39].

Streptomyces, Nocardia, Nonomuraea, and *Pseudoxanthomonas* are the dominant genera in the mesophilic phase and thermophilic phase, of which *Nocardia* is a human pathogenic bacteria. *Nonomuraea*, as a kind of *actinomycetes*, has the ability to produce antibiotics [11]. [16] reported that *Pseudomonas* is a member of *Proteobacteria*, which can utilize lignocellulose and benzene, etc. The relative abundance of complex and refractory organic matter as carbon and energy can improve the function of fermentation materials. From the end of the thermophilic phase to the mature period, the abundance of *Streptomyces* decreased significantly, and the abundance of *Streptosporangiaceae,* and *Sphaerimonospora* began to increase.

3.5 Differential analysis of microbial communities during sludge composting

Analyzed using the Wilcoxon rank sum test to the significance of differences in species abundance of the phylum and the genus level of the microbial community in the sludge compost samples after adding inoculants. The results are shown in Fig. 4.

Statistical differences in *Actinomycetes* abundance between TR and CK were significant. The addition of TNM and TSOB significantly reduced *Actinobacteriota* abundance, and the remaining bacterial phyla were not significantly different. [38] also found that the phylum-level species composition was similar across treatments despite differences in temperature, pH, nitrogen loss, and ion content caused by inoculation.

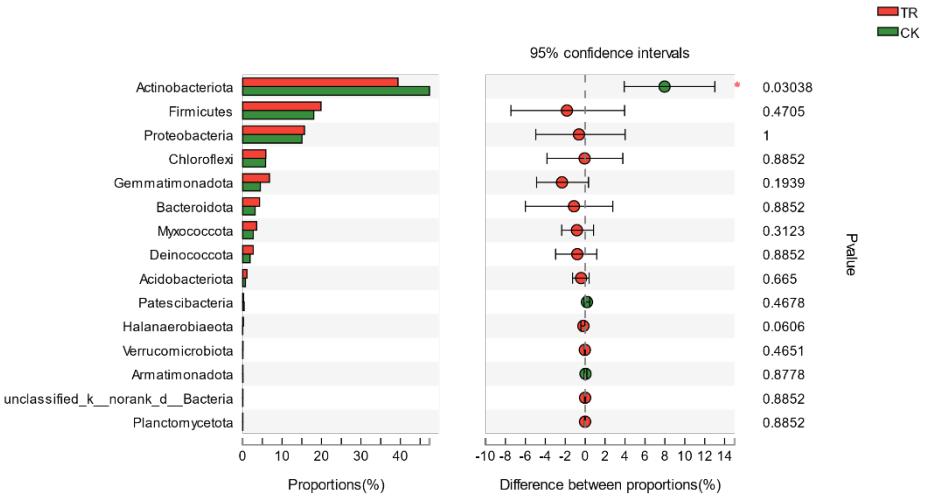


Figure 4. (a)

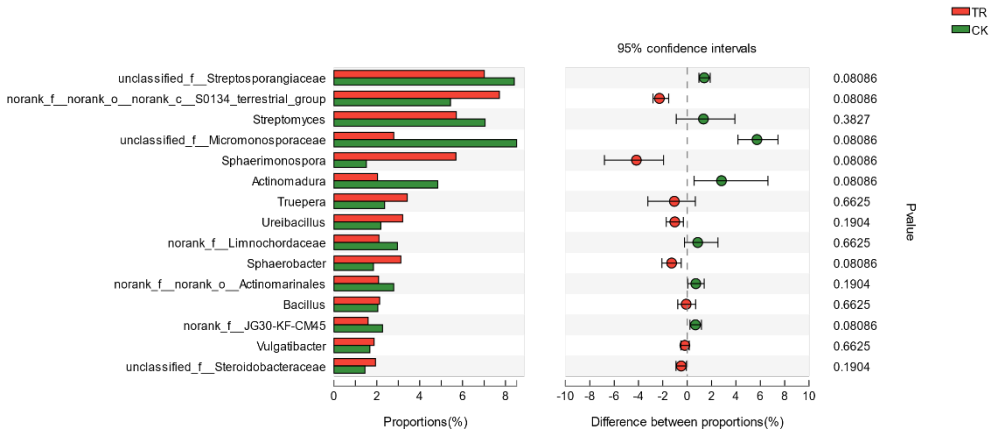
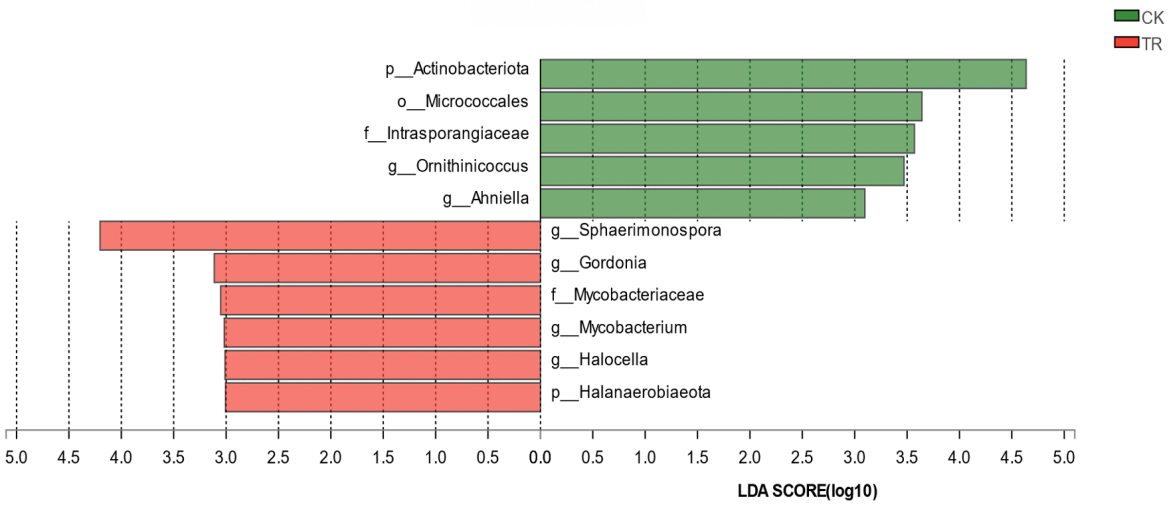


Figure 4. (b)



(c)

Figure 4 – Species differences between phylum levels (a) and genus levels (b) of microbial communities in SS samples after inoculation and difference analysis (c) between

Genus level microbial community composition results showed that the difference between TR and CK on Day 10 to Day 20 of composting was large and regular. It can be seen that although the difference was no statistically significant (P>0.05), there are 7 genera with obvious difference in P value around 0.08. Among them, *Streptosporangiaceae, Micromonosporaceae, Actinomadura* and *JG30-KF-CM45* were relatively abundant in CK. The relative abundance of *S0134_terrestrial_group*, *Sphaerimonospora,* and *Sphaerobacter* was higher in TR supplemented with TNM and SOD. It has been reported that *S.* spp. can grow and reproduce by producing enzymes such as (S)-w-transaminase and amino acids to degrade other refractory carbon sources and lignin under high temperature conditions [31]. [41] found that *Sphaerobacterium* spp. was significantly positively correlated with the maintenance of high temperature during the thermophilic phase, and it was the core microbial species for optimizing the composting process with external inoculants. *Sphaerimonospora* belongs to the *Actinobacteria* family *Streptomycetaceae*, which was originally established by Omura et al. (2016). He also described the morphology, chemical taxonomy and general characteristics of four species of bacteria in *Sphaerimonospora,* two of which were the nitrate reduction experiments were all positive in 2019. [17] tested a new strain of the genus *Sphaerimonospora* and showed that it was positive for cellulose and urea decomposition, positive for nitrate reduction, and negative for H_2S production. In conclusion, it can be speculated that the genus *Sphaerimonospora* may have nitrate-reducing properties.

Furthermore, the relative abundance of *Ureibacillus* at TR was also higher than CK (P=0.1904). *Ureibacillus* can not only decompose soluble organic matter, but also can produce extracellular hydrolase to decompose cellulose and hemicellulose macromolecular compounds [47]. Some studies have pointed out that *Ureibacillus* spp. is a degrader of organic matter, and it has been proved that *Ureibacillus* spp. increased humus levels [29]. In other words, from the higher abundance of *Bacillus* urea in the compost, it can be speculated that the inoculation of TR promoted the production of humus, and the compost body decomposed faster.

3.6 LEfSe indicator species during sludge composting

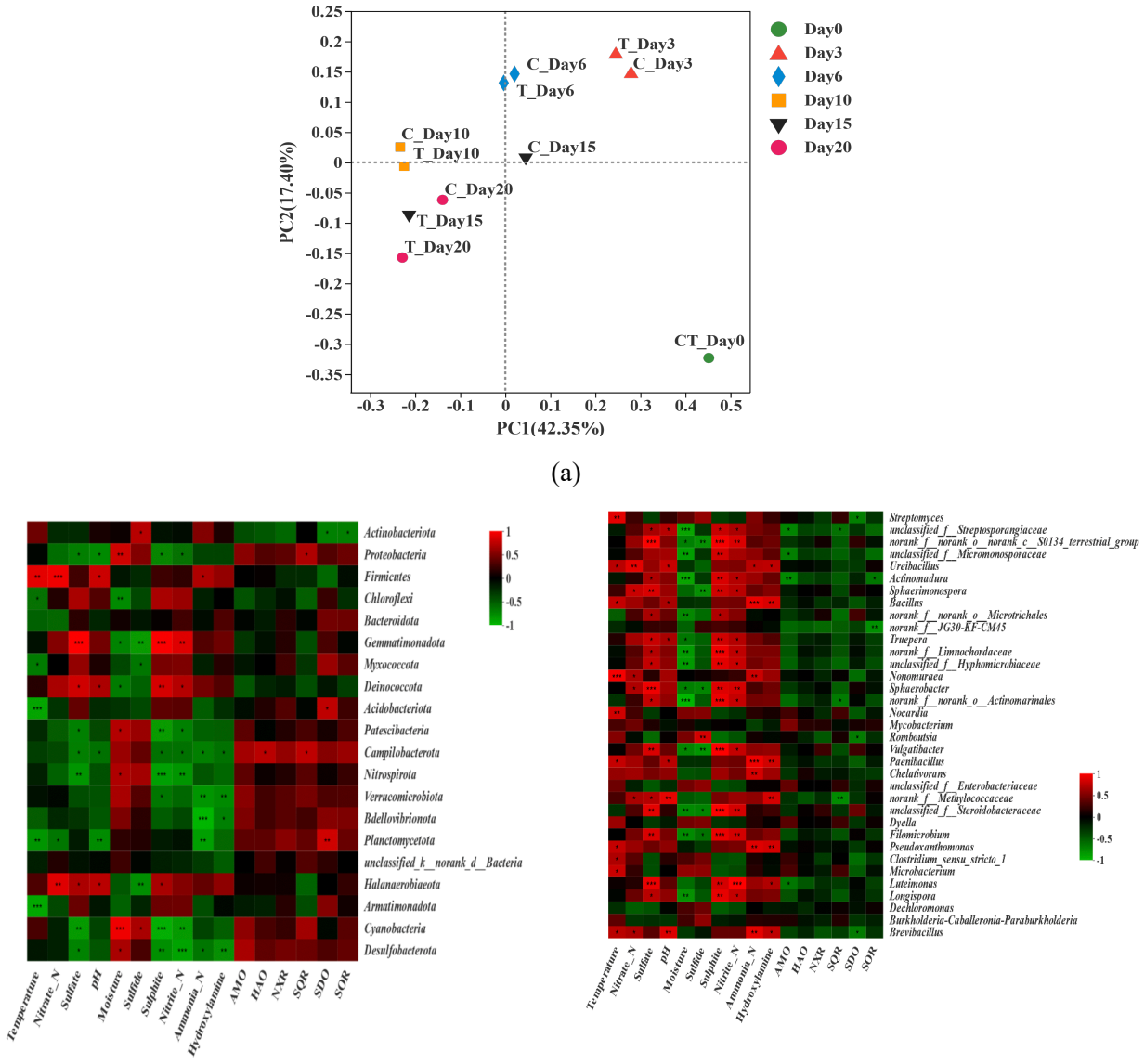
Linear discriminant analysis (LEfSe) can be used to discover the species characteristics in two or more groups of samples that differences between groups are best explain, and the degree to which these characteristics contribute to differences between groups. Using LEfSe analysis to compare the differences between TR and CK compost sample groups after inoculation, the linear regression analysis (LDA) discriminant histogram results are shown in Fig. 4c.

The LDA discriminant bar chart counts that have a significant effect on the difference between the two groups of the microbial groups. The larger the LDA score obtained by LDA analysis, species abundance have a greater effect on the difference effect. Differentially with LDA value>3.0 indicated

species (default 2.0) are screened in the Fig. 3c, and green (red) indicates that the relative abundance of differential species in CK (TR) is higher. The results showed that the indicator species in CK after inoculation were *Actinobacteriota, Micrococcales, Intrasporangiaceae, Ornithinicoccus* and *Ahniella*. The indicator species after inoculation in TR were *Sphaerimonospora, Gordonia, Mycobacteriaceae, Mycobacterium, Halocella, Halanaerobiaeota*. It can be seen that the LDA value of the genus *Sphaerimonospora* in TR is the highest. One of the TNM inoculated in this experiment is *Gordonella* spp. in the indicator species. It may be that the inoculation of the inoculum led to the emergence of this indicator species.

3.7 Correlation analysis of microorganisms and environmental factors in sludge composting process

Different microorganisms have great functional differences, and the above data analysis shows that the transformation of nitrogen and sulfur during composting may be closely related to the succession of microbial communities. RDA redundancy analysis and Spearman correlation analysis of microorganisms in sludge samples and various physical and chemical indexes of compost are shown in Figure 5.



(a)

(b) (c)

Figure 5 – Redundancy analysis of microorganisms and physical and chemical indexes of sludge compost samples at door level (a), Spearman correlation heat map of microorganisms and physical and chemical indexes of sludge compost samples at door level (b) and genus level (c).

The results of redundancy analysis show in Fig.5a that the first two axes can explain 69.76% and 21.84% of the total changes of community structure and physical and chemical indexes. Temperature has a strong positive correlation with *Actinomycetes* and a strong negative correlation with *Bacteroides*. *Proteobacteria* has a strong negative correlation with sulfate, sulfite, pH and ammonia nitrogen, and a strong positive correlation with water content. *Sclerochaeta*, *Campylobacter viridis* and *Budomonas* are negatively correlated with water content, but positively correlated with ammonia nitrogen, oxidized nitrogen ions and oxidized sulfur ions. There is a strong positive correlation between pH value and ammonia nitrogen, hydroxylamine nitrogen and nitrate nitrogen. Sulfide has the greatest influence on the distribution of sample communities on the third day, that is, the heating period.

In Fig. 5b, the phylum *Haloanaerobic* bacteria, as the indicator species of TR, had a significant positive correlation with nitrate, sulfate and sulfite, and a significant negative correlation with reducing sulfide, while *Actinobacteria* as an indicator species for the control group, there was no significant correlation with nitrogen-sulfur compounds, which were positively correlated with reducing sulfide and negatively correlated with sulfur dioxygenase (SDO) and sulfite oxidoreductase (SOR). The above results showed that the addition of high temperature resistant nitrifying bacteria and sulfur oxidizing bacteria indeed strengthened the nitrogen and sulfur conversion process in the pile.

Fig. 5c shows the Spearman correlation analysis between genus-level microorganisms and physicochemical indicators of theSS samples. Here, we focus on the dominant microbial genera with large abundance differences in the genus-level species difference analysis results. The analysis found that the three dominant genera, norank_f__norank_o__nora-nk_c__S0134_terrestrial_group, Sphaerimonospora (also the indicator microorganism species for the experimental group) and Sphaerobacter, which accounted for more in the experimental group, were all significantly negatively correlated with reducing sulfides, and all had negative correlations with sulfate, Nitrate, sulfite and nitrite showed a significant positive correlation; while the four dominant genera, unclassified_f__Streptosporangiaceae, unclassified_f__Micromonospora-ceae, Actinomadura, norank_f__JG30-KF, accounted for more in the control group -CM45 had no significant correlation with reducing sulfide and nitrate, and had a weak positive correlation with sulfate, sulfite and nitrite, indicating that the nitrogen-sulfur conversion in the experimental group was stronger.

The dominant microbial genera in the above experimental groups were not derived from inoculants, but the addition of high temperature-resistant nitrifying bacteria and sulfur-oxidizing bacteria promoted the local microorganisms related to nitrogen and sulfur transformation to become the dominant genera in the heap. It shows that the two types of external inoculants have a good synergistic promotion effect with native microorganisms, which is of great significance for the efficient optimization of the composting process by external inoculants.

3.8 Co-occurrence analysis of microbial genera during SS composting

So as to probe the interaction of microbial communities in the heap, the co-occurrence network relationship between the microbial communities in CK and TR was constructed using Spearman correlation analysis. In order to reduce the complexity of the network and enhance the accuracy of the results, filter out the original data for ASV sequences with an abundance less than 0.0005, correlation analysis was classified according to the phylum level and performed at the genus level. The results are shown in Fig. 6 (Supplementary information Figure S2).

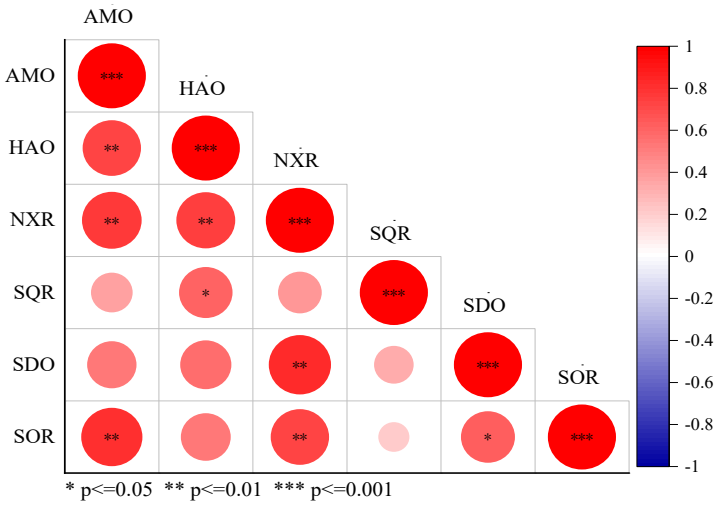


Figure 6 – Correlation analysis between key enzyme activities of nitrogen and sulfur conversion during sludge composting

The network graph of CK has a total of 150 nodes and 2,328 edges, of which the positive-related connections account for 57.73% and the negative-related connections account for 42.27%, TR has a total of 149 nodes and 2,883 edges, of which the positive-related connections account for 42.27%. The ratio is 55.95%, and the proportion of negatively correlated connections is 44.05%. Studies have shown [40] that the positive associations in the communities might be unstable and might respond strongly to vary in environmental factors. The total number of edges in TR was 24% higher than that CK, indicating that the interaction between the microbial communities was closer after the addition of TNM and SOD, which was similar to the results of some studies. The network analysis results of [41] showed that the inoculation of exogenous microorganisms can enhance the interaction between the core flora and further enhance the "link function" of the microbial community.

3.9 Changes of key enzyme activities of nitrogen and sulfur conversion with time during sludge composting

The change of properties with composting time, the results are shown in Fig. 7a-c. The activities of the three enzymes in CK decreased rapidly from Day 0 to Day 6 of composting, and then increased slowly with the gradual decrease of the temperature of the compost, the activity increased slowly. However, due to the mass death of microorganisms in the thermophilic phase, the reduction of moisture content and the slowdown of microbial metabolism in the later stage of composting, the recovery of enzyme activity is less. After adding the bacterial agent on Day 3 in TR, the activities of the three enzymes showed an increasing trend. AMO activity increased rapidly on the sixth day, exceeding the initial level of composting enzyme activity. HAO activity also began to increase on the sixth day until the tenth day days, and then the change trend was the same as that of CK. The activity of NXR showed an increasing trend on Day 10, which may be the early stage, the accumulation of ammonia oxidation and *nitrosation* reaction products provided sufficient substrates for the NXR enzymatic reaction. In a word, the three key enzymes of nitrification reaction AMO, HAO and NXR all showed a different trend of enzyme activity increase after inoculation compared with CK, and the enzyme activity was significantly improved compared with CK.

The activities of three key enzymes in the sulfur oxidation reaction, sulfur dioxygenase (SDO), sulfite oxidoreductase (SOR) and sulfide quinone oxidoreductase (SQR), which affect TSOD, were measured experimentally changes with composting time. The results are shown in Fig. 7d-f show. The activities of SQR and SOR in CK decreased rapidly in Day 3 to Day 6, but there was an upward trend in Day 3 to Day 6, which may be due to the fact that the oxygen concentration began to rise at this stage, and the restraint of hypoxia on the sulfur oxidation reaction decreased. With the continuous increase of thermophilic and the cooling phase of the compost during the decomposing stage, the two enzyme activities appeared a trend of rapidly decreasing and then slowly increasing, the changes of SDO activity were slightly different, and it decreased rapidly from Day 0 to Day 6, and then the

enzyme activity gradually increased. The change trend of SDO and SOR activities in TR was the same as that in CK, but their activity values were significantly higher than those in CK after inoculation (PSOR=0.01, PSDO=0.06). The SQR activity on Day 6 of TR was less than that of CK, probably because TR was at the highest temperature of the heap. With the decrease of temperature, the SQR activity recovered and was higher than that of CK.

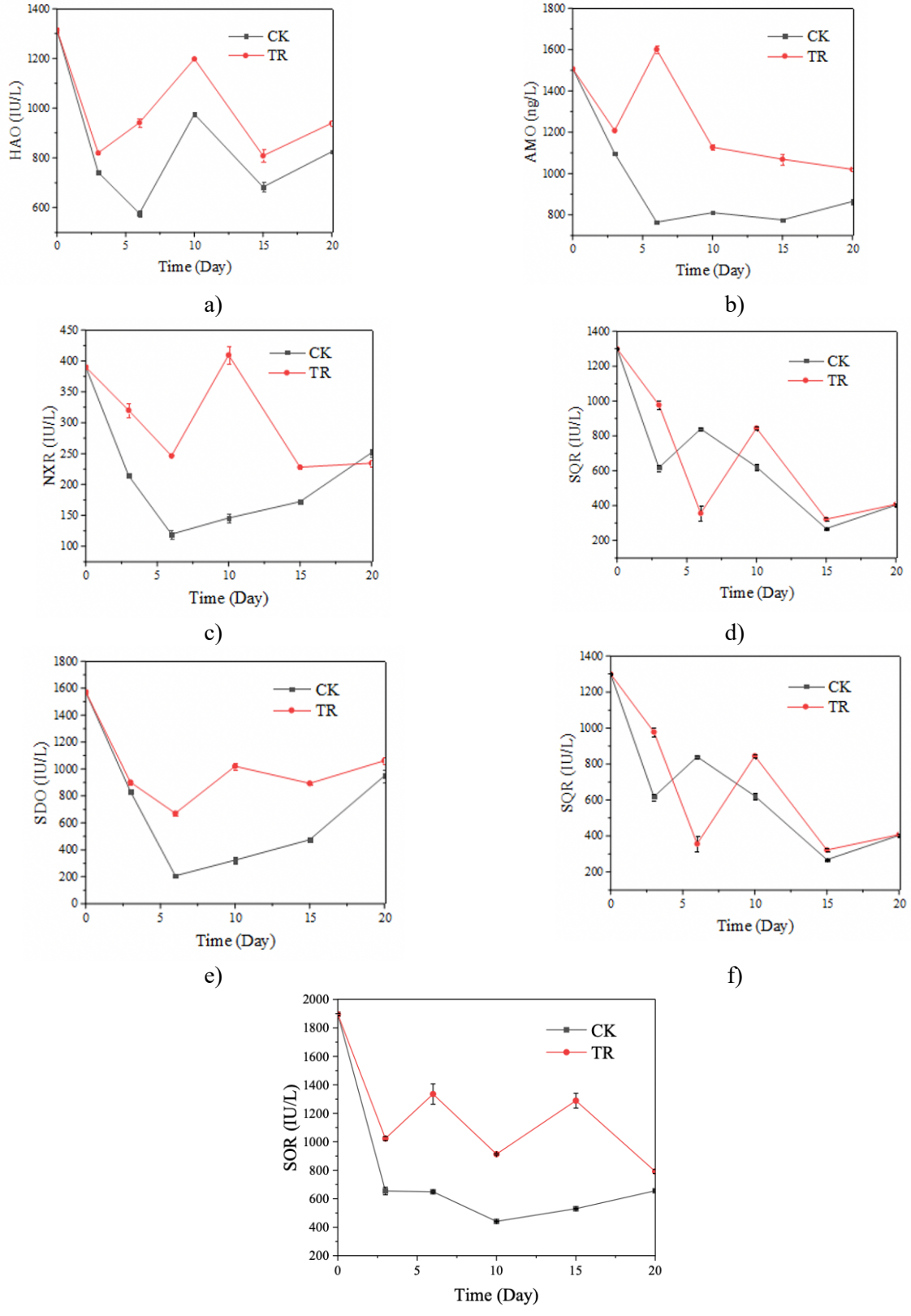


Figure 7 – Changes of key enzyme activities of nitrogen and sulfur conversion with time during SS composting

3.9 Correlation analysis of key enzyme activities of nitrogen and sulfur conversion during sludge composting

Fig. 8 (Supplementary information Figure S3) shows the results of Spearman correlation analysis between the six key enzyme activities of nitrification and sulfur oxidation. The results showed that the activities of the six enzymes were positively correlated. The three key enzymes of nitrification, AMO, HAO, and NXR, had a statistically significant positive correlation ($P<0.01$), indicating that ammonia nitrogen was oxidized to hydroxylamine, which was further oxidized to nitrite, and finally nitrified to form nitrate. There is no significant positive correlation between the three key enzymes of sulfur oxidation reaction SQR, SDO and SOR, only SDO and SOR have a positive correlation of statistically significant ($P<0.05$), which may be because of sulfur oxidation Metabolism is complex and diverse [23, 27]. In the process of sulfur oxidation, products such as sulfane sulfur, elemental sulfur, and thiosulfate are also involved. Various metabolic processes are regulated by many other key enzymes in sulfur oxidation, such as thiocyanate enzymes, thiotransferases, quinone thiosulfate oxidoreductases, thiosulfate dehydrogenases, tetrasulfate hydrolases, thiosulfate transferases and the like. Therefore, the positive correlation of the three key enzymes measured in this study is not obvious.

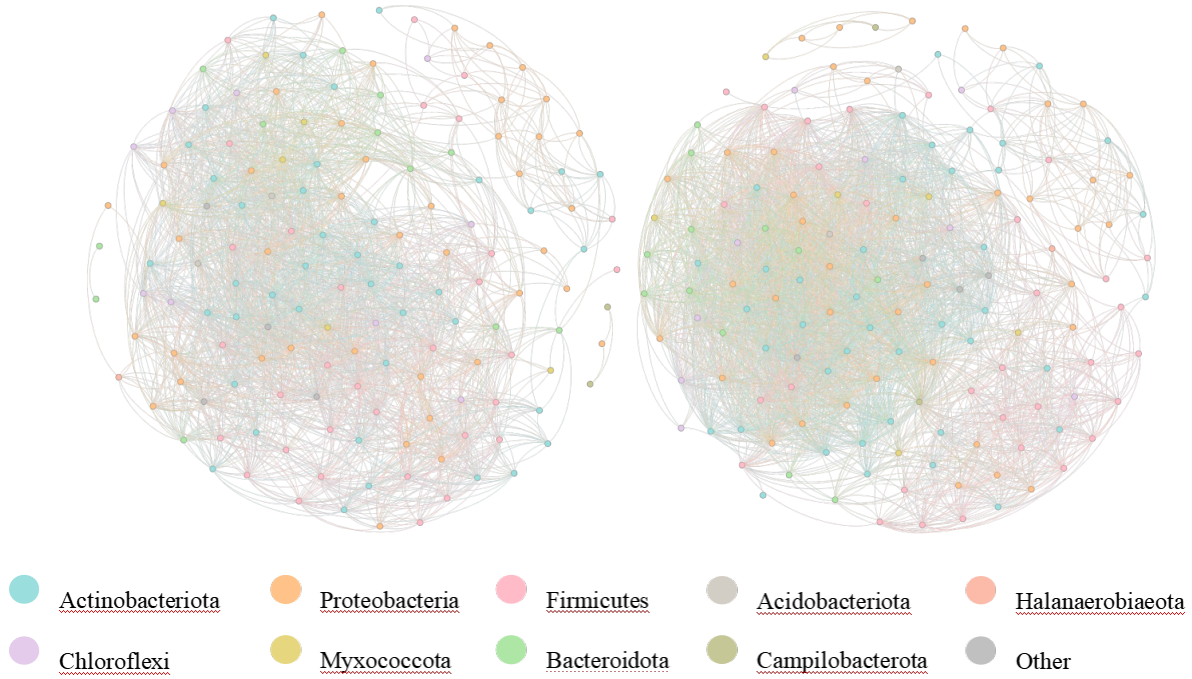


Figure 8 – Co-occurrence analysis of microbial genera during sludge composting

Since the inoculum used in the experiment contains TNM, the activities of three key enzymes in the nitrification reaction, hydroxylamine oxidase (HAO), ammonia monooxygenase (AMO) and nitrite oxidoreductase (NXR), were determined in the experiment.

Similar to the results of the key enzymes in the nitrification reaction, the activities of the three key sulfur-oxidation enzymes in TR all showed an increasing trend after the addition of TNM and TSOD. It may also be because the invertases is brought into the heap when the bacterial agent is added, which increases the basic value of the enzyme activity in there.

The correlation results between nitrification reaction and key converting enzymes of sulfur oxidation reaction showed that NXR was positively correlated with SDO and SOR ($P<0.01$), and NXR was the key enzyme in the oxidation of nitrite to nitrate. This result indicates a significant positive correlation between nitrate formation and sulfur oxidation process, revealing the possibility of nitrate acting as an electron acceptor for sulfur oxidation reaction during aerobic composting. There are also relationships between SQR and HAO, SOR and AMO A more significant positive correlation.

3.10 Correlation between key enzymes of nitrogen and sulfur conversion and microbial genera during SS composting

In order to investigate the relationship between microbial communities and key invertases activities in SS composting process, Spearman correlation analysis for construct a correlation network between enzyme activities and microorganisms, and ASV sequences with abundance less than 0.0005 were also excluded. For analysis, the significance level to 0.05 and the absolute value of the correlation coefficient was set to 0.06 and t. The results are shown in Fig. 9. The green and red lines represent negative and positive correlations, respectively. Fig. 9a and Fig. 9b show the results of the enzyme activity-microbe co-occurrence network of the CK and TR respectively. Fig. 9c is a partial enlarged view of the co-occurrence network of TR.

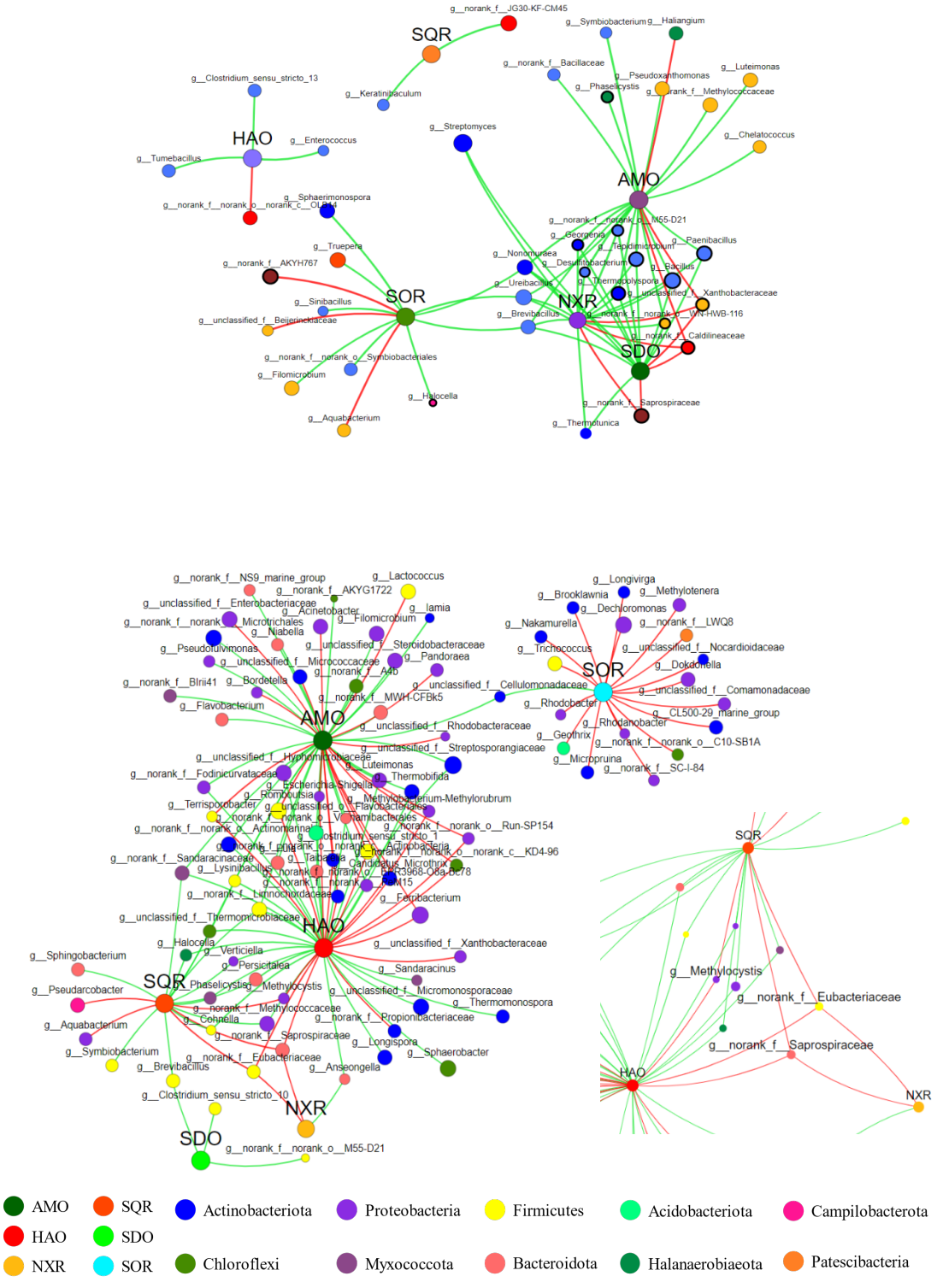
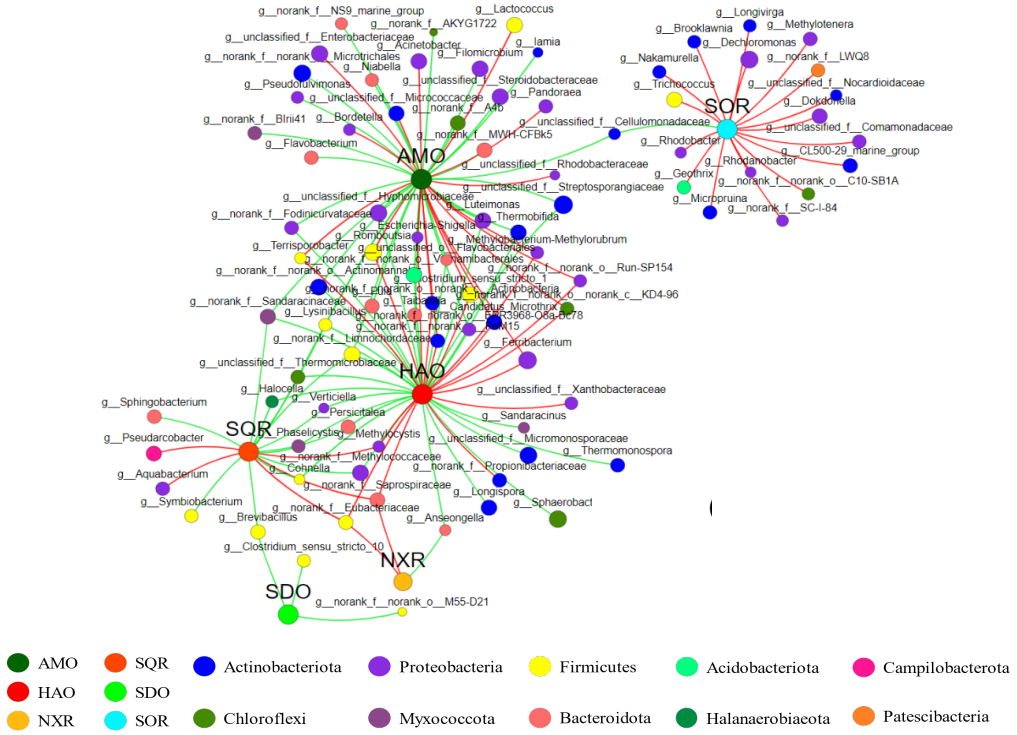


Figure 9. a)



b)

Figure 9 – Spearman Correlation Analysis of Key Enzyme Activities of Nitrogen and Sulfur Conversion and Genus-level Microorganisms in SS

There were 45 microbial genera significantly correlated with the activities of the six key invertases in CK, with a total of 71 correlation links, including 13 positive correlation links (18%) and 58 negative correlation links (82%). TR has 93 microbial genera significantly correlated with the activities of the six key invertases, with a total of 131 correlation links, including 58 positive correlation links (44%) and 71 negative correlation links (56%). That is added to the resistance after high temperature TNM and SOB, the number of microbial genera significantly correlated with the activities of key invertases in nitrification and sulfur oxidation reactions increased, and the proportion of microbial genera positively correlated with the activities of key invertases also increased significantly. It can be explained that the addition of the two types of bacteria increased the metabolic level of nitrogen and sulfur transformation during the composting process.

It is worth noting that the activities of HAO, NXR and SQR in TR have a relatively close positive correlation with the co-occurrence network of the microbial community. The two genera *Eubacteriaceae* and *Saprospiraceae* were significantly positively correlated with activities of HAO, NXR and SQR, *Methylotenera* was positively correlated with activities of HAO and SQR. As is well-known that NXR catalyzes the oxidation of nitrite to nitrate, HAO catalyzes the oxidation of hydroxylamine to nitrite, and SQR is the first enzyme in the reductive sulfide oxidation process. There are only three positive correlations between SDO and NXR in CK. This indicates that there may be a synergistic effect of microbial-mediated nitrification and sulfur oxidation in TR, which promotes the conversion of sulfur and nitrogen in the reactor. In addition, it can be found that these three genera and other positively related microbial genera are not derived from external inoculants, When [41] studied the co-occurrence of the core flora and microorganisms with external inoculants, their found that all the none of the species came from microbial inoculants. It shows the importance of strengthening the native functional bacteria in the pile. Inoculation can make the core microbial community from the native more complete, and the energy metabolism and nutrient degradation efficiency are higher. This result illustrates the positive activation of the two types of microbiota on the indigenous microbial community.

4. Conclusions

The results showed that added microbial inocula had little effect of the microbial community on the alpha diversity, but changed its succession direction, and the abundance of *Actinobacteria* in

TR was significantly reduced. The addition of microbial inocula promoted the transformation of nitrogen and sulfur, the three dominant genera and indicator species in TR were significantly correlated with the transformation of nitrogen and sulfur. The addition of microbial inocula increased the activities of the key enzymes involved in the microbial genera nitrogen-sulfur conversion and nitrogen-sulfur metabolism, and the positive correlation ratio was increased.

Acknowledgments

This work was financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51878216), Heilongjiang Provincial Research Institute Project (2022SSKY003), Wild Goose Array Special Projects (YZ2023SW01) and Preresearch Project of Heilongjiang Academy of Sciences (YY2020SW01).

REFERENCES

1. Andraskar, J., Yadav, S., Kapley, A. 2021. Challenges and Control Strategies of Odor Emission from Composting Operation. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, **193**(7), 2331-2356.

2. Ansola, G., Arroyo, P., Miera, L.E.S.d. 2013. Characterisation of the soil bacterial community structure and composition of natural and constructed wetlands. *Science of The Total Environment*, **473-474C**, 63-71.

3. Babbitt, C.W., Pacheco, A., Lindner, A.S. 2009. Methanol removal efficiency and bacterial diversity of an activated carbon biofilter. *Bioresource Technology*, **100**(24), 6207-6216.

4. Chen, C., Shen, Y., Shen, W., He, J., Lin, Z., Dong, Y. 2021. Defense responses of sulfur dioxygenase to sulfide stress in the razor clam Sinonovacula constricta. *Genes & Genomics*, **43**(5), 513-522.

5. Chen, G., Zhao, G., Cheng, W., Zhang, H., Shi, W. 2020. Rice nitrogen use efficiency does not link to ammonia volatilization in paddy fields. *Science of The Total Environment*, **741**, 140433.

6. Chen, L., Li, W., Zhao, Y., Zhang, S., Meng, L. 2022a. Evaluation of bacterial agent/nitrate coupling on enhancing sulfur conversion and bacterial community succession during aerobic composting. *Bioresource Technology*, **362**, 127848.

7. Chen, L., Li, W., Zhao, Y., Zhou, Y., Zhang, S., Meng, L. 2022b. Isolation and application of a mixotrophic sulfide-oxidizing Cohnella thermotolerans LYH-2 strain to sewage sludge composting for hydrogen sulfide odor control. *Bioresource Technology*, **345**, 126557.

8. Chen, L., Li, W., Zhao, Y., Zhou, Y., Zhang, S., Meng, L. 2022c. Isolation and application of a mixotrophic sulfide-oxidizing Cohnella thermotolerans LYH-2 strain to sewage sludge composting for hydrogen sulfide odor control. *Bioresource Technology*, **345**.

9. Chen, M., Chen, Y., Dong, S., Lan, S., Zhou, H., Tan, Z., Li, X. 2017. Mixed nitrifying bacteria culture under different temperature dropping strategies: Nitrification performance, activity, and community. *Chemosphere*, **195**, 800-809.

10. Chen, X., Du, G., Wu, C., Li, Q., Zhou, P., Shi, J., Zhao, Z. 2022d. Effect of thermophilic microbial agents on nitrogen transformation, nitrogen functional genes, and bacterial communities during bean dregs composting. *Environmental Science and Pollution Research*, **29**(21), 31846-31860.

11. Cheung, J.K., Wisniewski, J.A., Adams, V.M., Quinsey, N.S., Rood, J.I. 2016. Analysis of the virulence-associated RevSR two-component signal transduction system of Clostridium perfringens. *International Journal of Medical Microbiology Ijmm*, 429-442.

12. Chi, C.P., Chu, S., Wang, B., Zhang, D., Zhou, P. 2020. Dynamic bacterial assembly driven by Streptomyces griseorubens JSD-1 inoculants correspond to composting performance in swine manure and rice straw co-composting. *Bioresource Technology*, **313**, 123692.

13. Debruyn, J.M., Nixon, L.T., Fawaz, M.N., Johnson, A.M., Radosevich, M. 2011. Global Biogeography and Quantitative Seasonal Dynamics of Gemmatimonadetes in Soil. *Applied and Environmental Microbiology*, **77**(17), 6295-6300.

14. Dhamodharan, K., Varma, V.S., Veluchamy, C., Pugazhendhi, A., Rajendran, K. 2019. Emission of volatile organic compounds from composting: A review on assessment, treatment and perspectives. *The Science of the Total Environment*, **695**(Dec.10), 133725.1-133725.13.

15. Fang, Y., Jia, X., Chen, L., Lin, C., Chen, J. 2019. Effect of thermotolerant bacterial inoculation on the microbial community during sludge composting. *Canadian Journal of Microbiology*, **65**(2).

16. Fu, L., Bai, Y.N., Lu, Y.Z., Ding, J., Zhou, D., Zeng, R.J. 2019. Degradation of organic pollutants by anaerobic methane-oxidizing microorganisms using methyl orange as example. *Journal of Hazardous Materials*, **364**.

17. Han, C., Hu, J., Zhao, J., Tian, Y., Jiang, S., Guo, X., Xiang, W., Wang, X. 2019a. Sphaerimonospora triticiradicis sp. nov., a novel actinomycete isolated from a root of wheat (Triticum aestivum L.). *ANTONIE VAN LEEUWENHOEK*, **112**(3), 401–407.

18. Han, Z., Qi, F., Wang, H., Li, R., Sun, D. 2019b. Odor Assessment of NH3 and Volatile Sulfide Compounds in a Full-Scale Municipal Sludge Aerobic Composting Plant. *Bioresource Technology*.

19. Hristozova, T., Gotcheva, V., Tzvetkova, B., Paskaleva, D., Angelov, A. 2008. Effect of furfural on nitrogen assimilating enzymes of the lactose utilizing yeasts Candida blankii 35 and Candida pseudotropicalis 11. *Enzyme & Microbial Technology*, **43**(3), 284-288.

20. Hu, W., Zheng, G., Fang, D., Cui, C., Liang, J., Zhou, L. 2015. Bioleached sludge composting drastically reducing ammonia volatilization as well as decreasing bulking agent dosage and improving compost quality: A case study. *Waste Management*, **44**(OCT.), 55-62.

21. Jiang, J., Liu, X., Huang, Y., Huang, H. 2015. Inoculation with nitrogen turnover bacterial agent appropriately increasing nitrogen and promoting maturity in pig manure composting. *Waste Management*, **39**, 78-85.

22. Jiang, J., Wang, Y., Guo, F., Zhang, X., Zhu, G. 2020. Composting pig manure and sawdust with urease inhibitor: succession of nitrogen functional genes and bacterial community. *Environmental Science and Pollution Research*, **27**(1).

23. Kamilolu, A., Balaban, O.T., Kara, H.H. 2022. Changes of some bioactive and physicochemical properties during the black tea processing. *Journal of Food Science*, **87**(6), 2474-2483.

24. Ke, W., Chu, C., Li, X., Wang, W., Ren, N. 2018. Succession of bacterial community function in cow manure composing. *Bioresource Technology*, S0960852418308071-.

25. Li, Y., Li, W., Liu, B., Wang, K., Su, C., Wu, C. 2013. Ammonia emissions and biodegradation of organic carbon during sewage sludge composting with different extra carbon sources. *International Biodeterioration & Biodegradation*, **85**, 624-630.

26. Liang, C., Zhang, D., Zheng, X., Wen, X., Hou, C. 2021. Effects of different storage temperatures on the physicochemical properties and bacterial community structure of fresh lamb meat. *Food Science of Animal Resources*.

27. Liu, H., Cui, H., Xun, F., Xin, L.,Yu,f. 2016. Recombinant iwith sulfide: quinone oxidoreductase and persulfide dioxygenase rapidly oxidises sulfide to sulfite and thiosulfate via a new pathway. *Environmental microbiology*, **18**(12), 5123-5136.

28. Lu, L., Tan, H., Luo, G., Liang, W. 2012. The effects of Bacillus subtilis on nitrogen recycling from aquaculture solid waste using heterotrophic nitrogen assimilation in sequencing batch reactors. *Bioresour Technol*, **124**(none), 180-185.

29. Ma, V.G., Suarez-Estrella, F.F., Lopez, M.J., Moreno, J. 2006. Influence of microbial inoculation and co-composting material on the evolution of humic-like substances during composting of horticultural wastes. *Process Biochemistry*, **41**(6), 1438-1443.

30. Mao, Hui, Lv, Zhiyuan, Sun, Hongda, Li, Ronghua, Zhai, Bingnian. 2018. Improvement of biochar and bacterial powder addition on gaseous emission and bacterial community in pig manure compost. *Bioresource Technology: Biomass, Bioenergy, Biowastes, Conversion Technologies, Biotransformations, Production Technologies*.

31. Mathew, S., Nadarajan, S.P., Chung, T., Park, H.H., Yun, H. 2016. Biochemical characterization of thermostable [omega]-transaminase from Sphaerobacter thermophilus and its application for producing aromatic [beta]- and [gamma]-amino acids. *Enzyme and Microbial Technology*, **87**, 52.

32. Meng, L., Zhang, S., Gong, H., Wu, X., Li. C., 2018. Improving sewage sludge composting by addition of spent mushroom substrate and sucrose. *Bioresource Technology Biomass Bioenergy Biowastes Conversion Technologies Biotransformations Production Technologies*.

33. Meng, L., Li, W., Zhang, S., Wu, C., Lv, L. 2017. Feasibility of co-composting of sewage sludge, spent mushroom substrate and wheat straw. *Bioresource Technology*, S0960852416315693.

34. Naghdi, M., Cledon, M., Brar, S.K., Ramirez, A.A. 2018. Nitrification of vegetable waste using nitrifying bacteria. *Ecological Engineering*, **121**, 83-88.

35. Nakao, S., Nishio, T., Kanjo, Y. 2016. Simultaneous recovery of phosphorus and potassium as magnesium potassium phosphate from synthetic sewage sludge effluent. *Environmental Technology*, 1-25.

36. Iftikhar, A., Akira, Y., Atsushi, Y., Toru, F. 2020. Proposal of Lysinibacillus boronitolerans gen. nov. sp. nov., and transfer of Bacillus fusiformis to Lysinibacillus fusiformis comb. nov. and Bacillus sphaericus to Lysinibacillus sphaericus comb. nov. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, **66**(Pt.4), 1735-1744.

37. Qi, S., Ding, J., Yang, S., Jiang, Z., Xu, Y. 2022. Impact of Biochar Application on Ammonia Volatilization from Paddy Fields under Controlled Irrigation. *Sustainability*, **14**.

38. Qiu, Z., Li, M., Song, L., Wang, C., Wang, Y. 2020. Study on nitrogen-retaining microbial agent to reduce nitrogen loss during chicken manure composting and nitrogen transformation mechanism. *Journal of Cleaner Production*, **285**(2), 124813.

39. Ryu, H.W., Yoo, S.K., Choi, J.M., Cho, K.S., Cha, D.K. 2009. Thermophilic biofiltration of H2S and isolation of a thermophilic and heterotrophic H2S-degrading bacterium, Bacillus sp. TSO3. *Journal of Hazardous Materials*, **168**(1), 501-506.

40. Vries, F.T.d., Griffiths, R.I., Bailey, M., Craig, H., Girlanda, M., Gweon, H.S., Hallin, S., Kaisermann, A., Keith, A.M., Kretzschmar, M., Lemanceau, P., Lumini, E., Mason, K.E., Oliver, A., Ostle, N., Prosser, J.I., Thion, C., Thomson, B., Bardgett, R.D. 2018. Soil bacterial networks are less stable under drought than fungal networks. *Nature Communications*, **9**(1).

41. Wang, B., Wang, Y., Wei, Y., Chen, W., Ding, G., Zhan, Y., Liu, Y., Xu, T., Xiao, J., Li, J. 2021. Impact of inoculation and turning for full-scale composting on core bacterial community and their co-occurrence compared by network analysis. *Bioresource technology*, **345**, 126417.

42. Wei, H., Wang, L., Hassan, M., Xie, B. 2018. Succession of the functional microbial communities and the metabolic functions in maize straw composting process. *Bioresource Technology*, **256**.

43. Yang, S., Song, L. 2019. Succession of bacterial community structure and metabolic function during solid waste decomposition. *Bioresource Technology*, **291**, 121865.

44. Yi, Z.A., Wla, B., Li, C.A., Lm, C., Zz, A. 2020. Effect of enriched thermotolerant nitrifying bacteria inoculation on reducing nitrogen loss during sewage sludge composting. *Bioresource Technology*, **311**.

45. You, J., Chen, J., Sun, Y., Fang, J., Cheng, Z., Ye, J., Chen, D. 2021. Treatment of mixed waste-gas containing H2S, dichloromethane and tetrahydrofuran by a multi-layer biotrickling filter. *Journal of Cleaner Production*, **319**, 128630.

46. Yuan, H., Li, Y., Wang, K. 2020. Effect of influent ammonia nitrogen concentration on microbial community in MBBR reactor. *Water Science & Technology*, **83**(6).

47. Zhang, J., Cai, X., Qi, L., Shao, C., Lin, Y., Zhang, J., Zhang, Y., Shen, P., Wei, Y. 2015. Effects of aeration strategy on the evolution of dissolved organic matter (DOM) and microbial community structure during sludge bio-drying. *Applied Microbiology and Biotechnology*, **99**(17), 7321-7331.

48. Zhu, P., Shen, Y., Pan, X., Dong, B., Li, X. 2021. Reducing odor emissions from feces aerobic composting: additives. *RSC Advances*, **11**(26), 15977-15988.

49. Zhu, Y.L., Zheng, G.D., Gao, D., Chen, T.B., Wu, F.K., Niu, M.J., Zou, K.H. 2016. Odor composition analysis and odor indicator selection during sewage sludge composting. *Air Repair*, **66**(9), 930-940.

УДК 544.723 DOI: 10.37816/eeste-2024-1-191-195

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД МИНЕРАЛЬНЫМИ И ВОЛОКНИСТЫМИ СОРБЕНТАМИ
ANALYSING THE EFFICIENCY OF WASTEWATER PURIFICATION BY MINERAL AND FIBRE SORBENTS

Алена Анатольевна Казначеева, Ирина Игоревна Меньшова, Юлия Михайловна Аверина
Alena A. Kaznacheeva, Irina I. Menshova, Yulia M. Averina

Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Россия, Москва
Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Russia, Moscow
(e-mail: imenshova2022 gmail.com)

Аннотация: Рассмотрены факторы, влияющие на процесс сорбции органических загрязнителей сорбентами различного происхождения. Показано, что выбор сорбента для очистки стоков должен основываться на характеристиках загрязнений и условиях проведения процесса адсорбции с учетом химической стабильности, эффективности удержания загрязнений и экономичность использования сорбента.

Abstract: Factors influencing the process of sorption of organic contaminants by sorbents of different origin are considered. It is shown that the choice of sorbent for wastewater treatment should be based on the characteristics of contaminants and conditions of the process, taking into account chemical stability, efficiency of retention of contaminants and economical use of the sorbent

Ключевые слова: сорбция, органические загрязнители
Keywords: sorption, organic contaminants

Предприятия различных отраслей промышленности потребляю значительное количество чистой пресной воды и, соответственно, имеют значительные объемы сбрасываемых сточных вод. Основными загрязняющими веществами являются взвешенные вещества, нефтепродукты и другие органические загрязнения, основные анионы (хлориды, сульфаты, нитраты и т.п.) и ионы тяжелых металлов.

Адсорбционный метод очистки является привлекательным подходом к очистке стоков, особенно потому, что адсорбент не требует предварительной обработки перед его применением отработанного адсорбента, является эффективным и простым методом, в котором практически не образовываются нежелательные побочные продукты, и который обеспечивает хороший процент удаления красителя.

Объектами исследования в работе являются сорбенты: активированный уголь марка БАУ-А, ГОСТ 6217-74; каолин ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$), ГОСТ 19607-74; шунгит фракционный 1-5 мм, ГОСТ 8267-93; полипропиленовое волокно (ПНСН-С); льносодержащее волокно (ПНЛС); полиэфирное волокно (ПЭ); волокно на основе пенополистирола (ППС); бамбуковое волокно (БВ). Красители: Прямой красный 2С, Прямой зеленый св., Прямой синий СВ, Прямой зеленый ЖХ, Прямой красный-28, Прямой черный-22, Кислотный желтый св., Кислотный синий К , Кислотный красный, Кислотный синий, Метиленовый голубой, Метиловый фиолетовый.

В работе исследовали влияние массы вводимых адсорбентов на процесс извлечения из модельных растворов водорастворимых красителей. Полученные результаты позволяют считать, что минеральный сорбент способен эффективно извлекать из воды красители. [1,2]. Из полученных данных можно сделать вывод о том, что сорбционная активность минеральных адсорбентов зависит не только от количества сорбента, соответственно наблюдается увеличение общей удельной площади поверхности сорбента и становится больше активных центров адсорбции. Количество и состав функциональных групп красителя также влияет на

сорбционную активность, данная зависимость соблюдается для всех исследуемых сорбентов. Кинетические кривые извлечения водорастворимых красителей, показывают, что минеральные сорбенты имеют в среднем эффективную продолжительность сорбции 30 минут, волокнистые материалы также сорбируют красители, а сорбент на основе бамбукового волокна, в течение 10 минут извлекает водорастворимый краситель на 99,9 % [4,5,6].

В данной работе был проведен анализ влияния температуры, pH - среды на адсорбционную активность минеральных и волокнистых сорбентов. Сорбционная способность минеральных сорбентов по отношению к исследуемым красителям наблюдается в слабокислой среде, повышение температуры существенно не влияет на этот процесс. Влияние температуры на процесс адсорбции волокнистыми сорбентами зависит от природы волокна и колеблется от 30°С до 80°С, а изменение pH среды процесса адсорбции не влияет на ее эффективность. Сорбция основана на физической адсорбции, то есть на взаимодействии между молекулами красителя и поверхностью материала [5,6,7,8].

Для изучения характера адсорбции на сорбентах и определения основных сорбционных свойств исследуемых материалов были построены изотермы адсорбции

($\Gamma_i = f(C_{равн})$). Величина адсорбции компонента i – Γ_i (мг/г) – это количество

адсорбируемого вещества, находящегося в объеме адсорбционного слоя, отвечающее единице массы адсорбента. В таблицах 1и 2 представлены примеры адсорбционной емкости и эффективности использования сорбентов [1,2,3,4,8].

Таблица 1 — Значение адсорбционной емкости и эффективности минеральных сорбентов

Краситель	Молярная масса красителя	Значение концентрации, сорбционной емкости, эффективности очистки	№ модельного раствора красителя				
			1	2	3	4	5
Шунгит фракции 1-5 мм							
Прямой красный 2С	1060	C_0, мг/л	50	100	150	200	250
		C_i, мг/л	2	14	27	61	105
		Γ_i, мг/г	0,8	1,4	2,0	2,3	2,4
		$Э_i$, %	96	86	81	70	58
Прямой зеленый св.	1354	C_0, мг/л	50	100	150	200	250
		C_i, мг/л	0	3	7	39	101
		Γ_i, мг/г	1	1,9	2,9	3,2	3,0
		$Э_i$, %	100	97	94	80	60
Кислотный желтый св.	380	C_0, мг/л	50	100	150	200	250
		C_i, мг/л	17	48	86	120	148
		Γ_i, мг/г	0,3	0,5	0,6	0,8	1,0
		$Э_i$, %	66	52	43	40	40
Кислотный синий К	681	C_0, мг/л	50	100	150	200	250
		C_i, мг/л	0	2	5	7	113
		Γ_i, мг/г	1	3,2	4,8	6,4	4,6
		$Э_i$, %	100	98	97	96	68
Кислотный красный	480	C_0, мг/л	10	15	25	40	50
		C_i, мг/л	0,5	1,0	2,0	3,0	9,0
		Γ_i * 10, мг/г	0,32	0,42	0,69	1,11	1,23
		$Э_i$, %	95	93,3	92	92,5	82
Каолин							
Прямой синий СВ	1039	C_0, мг/л	50	100	150	200	250
		C_i, мг/л	10	19	24	31	34
		Γ_i, мг/г	4,0	8,1	12,6	16,9	21,6

Краситель	Молярная масса красителя	Значение концентрации, сорбционной емкости, эффективности очистки	№ модельного раствора красителя				
			1	2	3	4	5
		$Э_i$, %	80	81	83	85	87
Прямой зеленый ЖХ	812	C_0, мг/л	50	100	150	200	250
		C_i, мг/л	40	76	108	140	162
		$Г_i$, мг/г	1,0	2,4	4,2	6,0	8,0
		$Э_i$, %	20	24	28	30	35
Прямой красный 28	692	C_0, мг/л	20	30	40	50	
		C_i, мг/л	1,88	1,74	10	8,71	
		$Г_i$, мг/г	3,02	4,71	5,00	5,21	
		$Э_i$, %	90,6	94,2	75	82,6	
Прямой черный 22	1083	C_0, мг/л	20	30	40	50	
		C_i, мг/л	7,6	15,9	24,9	33,7	
		$Г_i$, мг/г	2,06	2,34	2,52	2,706	
		$Э_i$, %	62	47	37,7	32,6	
Активный уголь марки БАУ-А							
Прямой красный 2С	1060	C_0, мг/л	50	100	150	200	250
		C_i, мг/л	7	12	23	48	58
		$Г_i$, мг/г	0,5	0,9	1,4	1,7	2,1
		$Э_i$, %	86	88	84	76	76
Прямой зеленый св.	1354	C_0, мг/л	50	100	150	200	250
		C_i, мг/л	5	14	34	50	81
		$Г_i$, мг/г	0,6	1,1	1,5	1,9	2,1
		$Э_i$, %	90	86	77	75	67
Прямой синий СВ	1039	C_0, мг/л	50	100	150	200	250
		C_i, мг/л	7	12	15	18	20
		$Г_i$, мг/г	4,3	8,8	13,5	18,2	23,0
		$Э_i$, %	86	88	90	91	92
Прямой зеленый ЖХ	812	C_0, мг/л	50	100	150	200	250
		C_i, мг/л	10	16	19	21	23
		$Г_i$, мг/г	4,0	8,4	13,1	17,9	22,7
		$Э_i$, %	80	84	86	90	91
Кислотный желтый св.	380	C_0, мг/л	50	100	150	200	250
		C_i, мг/л	2	7	12	34	44
		$Г_i$, мг/г	0,7	1,3	1,9	2,3	2,9
		$Э_i$, %	96	93	92	83	82
Кислотный синий К	681	C_0, мг/л	50	100	150	200	250
		C_i, мг/л	13	24	68	103	122
		$Г_i$, мг/г	0,5	1,0	1,2	1,4	1,8
		$Э_i$, %	74	76	55	48	51
Кислотный красный	480	C_0, мг/л	10	15	25	40	50
		C_i, мг/л	1,0	1,5	2,0	3,5	4,0
		$Г_i$, мг/г	0,12	0,17	0,3	0,47	0,6
		$Э_i$, %	90	90	92	91,25	92

Таблица 2 — Значение адсорбционной емкости и текущей эффективности волокно-сорбент

Значение концентрации, сорбционной емкости, эффективности очистки	№ модельного раствора красителя					
	1	2	3	4	5	6
Волокно на основе пенополистирола – малахитовый зеленый (ММ=365)						
C_0, мг/л	200	400	600	800	1000	1200
C_i, мг/л	7	20	34,8	60	140	240
$Г_i$, мг/г	965	1920	2826	3700	4300	4800
$Э_i$, %	96,5	95	94,2	92,5	86	80
Волокно на основе пенополистирола – метиленовый синий (ММ=320)						
C_0, мг/л	200	400	600	800	1000	1200
C_i, мг/л	7	16	26	158	295	435
$Г_i$, мг/г	965	1920	2870	3205	3525	3825
$Э_i$, %	96,5	96,0	95,7	80,25	70,5	63,75
Бамбуковое волокно – кристаллический фиолетовый (ММ=408)						
C_0, мг/л	900	1000	1100	1200	1250	1300
C_i, мг/л	20,8	32,0	86,4	152,0	194,0	228,0
$Г_i$, мг/г	1098	1210	1267	1310	1320	1340
$Э_i$, %	97,7	96,8	92,15	87,3	84,5	82,5
Активированное углеродное волокно – метиленовый синий (ММ=320)						
C_0, мг/л	50	60	70	80	90	
C_i, мг/л	7	10,2	16,1	22,4	35	
$Г_i$, мг/г	8,6	10,0	10,8	11,4	11,0	
$Э_i$, %	86	83	77	72	61,1	
Активированное углеродное волокно – дисперсный темно-синий (ММ=637)						
C_0, мг/л	50	60	70	80	90	
C_i, мг/л	0,6	0,9	1,33	1,52	2,07	
$Г_i$, мг/г	9,88	11,82	13,74	15,7	17,58	
$Э_i$, %	98,8	98,5	98,1	98,1	97,7	

Выводы

Показано, что минеральные и волокнистые сорбенты могут эффективно извлекать водорастворимые органические красители. Установлено, что наиболее эффективным сорбентами являются сорбенты на основе углеродного бамбукового волокна, а также волокно на основе пенополистирола. Физико-химические параметры процесса адсорбции красителей зависят от вида сорбента. Кроме того, было выявлено, что процесс сорбции также зависит от молекулярной массы красителей их структуры и растворимости в воде. Результаты экспериментов могут быть использованы в дальнейшем для оптимизации, процессов очистки воды и разработки новых методов очистки сточных вод, содержащих красители.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Меньшова И.И., Сафонов В.В., Булулукова И.И. Применение шунгитового сорбента в адсорбционном способе очистки сточных вод, содержащих водорастворимые красители. Изв.ВУЗов. Технология текстильной промышленности. 2013. №2. С.84-87.

2. Пыркова М. В., Меньшова И. И. Фролова Е. А. и Чупартинова Э. М. Сорбенты в очистке сточных вод красильно-отделочного производства Бутлеровские сообщения. 2014. Т.37. №2. С.66-70.

3. Заболотная Е., Меньшова И.И. Физико-химический метод извлечения органических соединений из сточных вод. Успехи в химии и химической технологии. 2018. Т. 32. № 8 (204). С.6-7.

4. Меньшова И.И., Заболотная Е., Челноков В.В., Гарабаджиу А.В. Адсорбция органических веществ с применением цеолитов/ И.И. 168 Меньшова, Е. Заболотная, В.В. Челноков, А.В. Гарабаджиу// Изв. вузов. Химия и хим. технология. Вып. 8. 2021. – с. 131-13.

5. Stepanov, S.V., Strelkov, A.K., Panfilova, O.N. Removal of heavy metals from wastewater with natural and modified sorbents// Magazine of Civil Engineering 2022. 111(3). Article No. 11110.

6. Генис А.В. Перспективные разработки в производстве волокнистых полимерных сорбентов [Текст]/Генис А.В., Кузнецов А.В./ Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева), 2019, т.LXIII, №1, с. 27-45.

7. Калинин В.О. Применение углеродных волокнистых сорбентов для очистки водных растворов/В.О. Калинин, А.Д. Дмитриева, А.Л. Евдокимов, Н.П. Моргун. – Текст: непосредственный//Молодой ученый. – 2017. - №2.1 (136.1). – с.11-14.

8. Меньшова И.И., Аверина Ю.М., Заболотная Е. Углеродные волокна в адсорбционных процессах. Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2023. Т. 66. Вып. 3. С. 52-58.

УДК 621.43 DOI: 10.37816/eeste-2024-1-195-198

СНИЖЕНИЕ ТОКСИЧНОСТИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ
REDUCING THE TOXICITY OF DIESEL ENGINE EXHAUST GASES

Владислав Дмитриевич Винокуров*, Лилия Николаевна Звягина, Жанна Юрьевна Кочетова***
Vladislav D Vinokurov*, Lilia N. Zvyagina, Zhanna Yu. Kochetova***

**Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Россия, Воронеж*
**Military Educational and Scientific Center Air Force «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy», Russia, Voronezh*
(e-mail: vinbrothers@mail.ru)
***Воронежский государственный технический университет, Россия, Воронеж*
***Voronezh State Technical University, Russia, Voronezh*
(e-mail: zvyagina.l@list.ru)

Аннотация. Проведен анализ влияния характеристик рабочего процесса дизельных двигателей на экономичность расхода топлива и токсичность отработавших газов. Установлено, что насос УТН обеспечивает наиболее благоприятные изменения содержания токсичных компонентов в отработавших газах двигателя Д-21А; возможно регулирование состава отработавших газов и расхода топлива путем изменения диаметра камеры сгорания и формы всасывающего канала.

Abstract: The analysis of the influence of the characteristics of the working process of diesel engines on the efficiency of fuel consumption and the toxicity of exhaust gases is carried out. It is established that the UTN pump provides the most favorable changes in the content of toxic components in the exhaust gases of the D-21A engine; it is possible to regulate the composition of exhaust gases and fuel consumption by changing the diameter of the combustion chamber and the shape of the suction channel.

Ключевые слова: дизельный двигатель, отработавшие газы, рабочие характеристики двигателя, загрязнение атмосферы, автотранспорт, экология.

Keywords: diesel engine, exhaust gases, engine performance, atmospheric pollution, motor transport, ecology.

Дизельные двигатели широко применяются на судах, тепловозах, автобусах, грузовых автомобилях, тракторах, танках, дизельных электростанциях. К концу XX века они получили

распространение и на легковых автомобилях. При сгорании в двигателе 1 т дизельного топлива в атмосферу выбрасываются с отработавшими газами (ОГ) 60 кг нитратов азота NO_x, 8 кг оксида углерода CO, 3кг несгоревших нефтеуглеводородов C_xH_y, 2–6 кг оксида серы SO_2 и другие токсичные компоненты [1]. Суммарный выброс токсичных веществ транспортными средствами настолько велик, что он представляет собой угрозу для окружающей среды и здоровья человека. Сами топлива и продукты их сгорания являются маркерами экологически обусловленных заболеваний [2, 3].

Для снижения выбросов вредных веществ с отработавшими газами дизелей уже более 40 лет используют следующие подходы [4, 5]: автоматическое регулирование угла опережения впрыска топлива; рециркуляция отработавших газов; впрыск воды в цилиндры двигателя совместно с топливом; использование предкамерного смесеобразования; снижение температуры свежего заряда в цилиндрах двигателя путем промежуточного охлаждения надувочного воздуха; совершенствование процессов смесеобразования; совершенствование топливоподающей аппаратуры; применение нейтрализаторов; использование присадок к топливам. Проведенные исследования экономичности, токсичности и дымности дизельных двигателей показали, что наибольшее влияние на эти параметры оказывают характеристики рабочего процесса самого двигателя [6].

На рисунке 1 представлены результаты исследования влияния скорости движения плунжера насоса типа 4АМТНМ на двигателе Д-240 при значении среднего индикаторного давления P_i=0,9 МПа на химический состав ОГ. Изменение скорости движения плунжера достигалось изменением угла начала подач топлива по кулачковому валу топливного насоса при помощи прокладок под нагнетательную секцию.

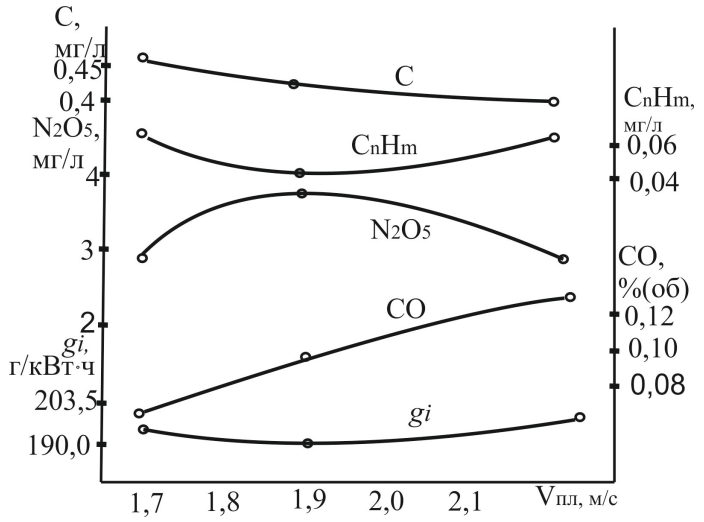


Рисунок 1 — Зависимости удельного индикатора расхода топлива g_i концентраций токсичных компонентов отработавших газов дизеля с одноцилиндровым отсеком размерности D×S = 110×125 от начальной скорости движения плунжера топливного насоса.

Установлено, что изменение скорости движения плунжера в момент начала подачи топлива незначительно влияет на содержание токсичных компонентов в отработавших газах, особенно при нагрузках, меньших номинальной. Минимальный удельный индикаторный расход топлива g_i имеет место при скорости движения плунжера 1,9 м/с (геометрически угол начала подачи топлива 58° по кулачковому валу) При среднем индикаторном давлении < 0,8 МПа и при всех значениях скорости движения плунжера g_i изменяется очень незначительно. Таким образом, при существующей комплектации насосной секции для двигателя Д-240 наиболее выгодной является скорость движения плунжера топливного насоса около 1,9 м/с.

На двигателе Д-21 были проведены испытания с тремя типами топливных насосов: НД, УТН и МТНМ. Эти насосы отличаются не только геометрическими размерами плунжеров, но и характеристиками впрыска топлива. Насос НД-21/2 обеспечивает более короткий впрыск, но

несколько замедленную отсечку, в то время как насосы типа УТН и МТНМ имеют увеличенную продолжительность впрыска, но более четкую отсечку. Испытания показали, что с позиции топлив экономичности наиболее выгодным является насос НД, а с позиции токсичности — УТН. Применение насоса МТНМ обеспечивает промежуточные значения величин, характеризующих топливную экономичность и токсичность двигателей.

Особое внимание было уделено изучению влияния интенсивности вращения вихревого потока свежего заряда, организованного в цилиндре в процессе впуска, на расход топлива и показатели токсичности двигателей с различными формами и размерами камер сгорания. На рисунке 2 представлены результаты исследования одноцилиндрового отсека D×S=110×125 мм с камерой ЯМЗ на скоростном режиме максимального крутящего момента при постоянном коэффициенте избытка воздуха, равном 1,4. Для создания вращательного движения потока свежего заряда применялся впускной клапан с ширмой, поворотом которого изменялась интенсивность закрутки потока воздуха. Закрутку потока оценивали вихревым отношением Ω, рассчитанным для конца впуска.

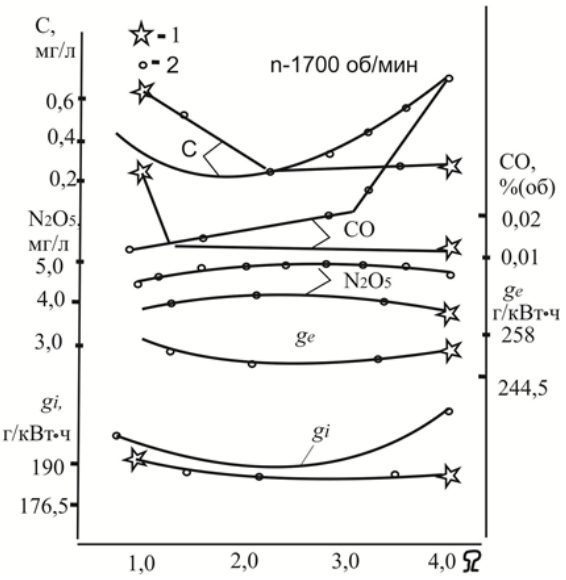


Рисунок 2 — Влияние интенсивности закрутки воздушного заряда Ω на состав отработавших газов и удельные расходы топлива *g* дизеля с одноцилиндровым отсеком размерности D×S=110×125с камерами сгорания типа ЦНИДИ (1) и ЯМЗ (2).

С увеличением закрутки потока от 0 до 1,9 происходит снижение содержания в ОГ сажи, углеводородов и окиси углерода. При этом снижается также удельный расход топлива. Содержание окислов азота в отработавших газах увеличивается.

При увеличении вихревого отношения Ω до 3,0 и более происходит ухудшение сгорания топлива. Причиной этого является «перезавихривание» заряда. Это означает, что пары топлива и продукты сгорания одного топлива факела попадают в зону действия соседнего. Такой же характер изменения показателей наблюдается и при номинальном режиме работы двигателя (*n*=2200 об/мин).

Изучено влияние диаметра камеры сгорания типа ЯМЗ на расход топлива и уровень содержания токсичных компонентов в отработавших газах. Испытывались камеры с диаметром 52, 54, 56 и 58 мм. В процессе исследований было установлено, что при работе как с 4- и 5-сопловыми распылителями камера с диаметром 54 мм обеспечивала лучшую характеристику удельного расхода топлива.

Количество сажи в ОГ мало зависит от диаметра камеры сгорания и числа сопловых отверстий распылителя. Наименее чувствительной к скорости вихря по сажеобразованию оказалась камера с диаметром 52 мм (концентрации углерода 0,25 – 1,2 мг/л). Наиболее

чувствительна камера с диаметром 54 мм, где минимум концентрации углерода составил 0,15 мг/л при Ω = 4.1, а максимум – 1,7 ми/л при Ω ≈ 0.

Концентрация NO_x на скоростном режиме максимального крутящего момента при всех значениях вихревого отношения и для всех диметров камер изменяется от 1,25 до 5 мг/л.

Проведены исследования по оценке влияния закрутки потока в процессе впуска на расход топлива и состав отработавших газов одноцилиндрового отсека того же размера, но с камерой ЦНИДИ (рисунок 2). Испытания проводили при частоте вращения коленчатого вала дизеля n=1700 об/мин и коэффициенте избытка воздуха α= 1,5. Характер зависимости концентрации токсичных компонентов в ОГ и удельного расхода топлива от Ω с камерой ЦНИДИ отличается от характера таковых для камеры типа ЯМЗ. Здесь не наблюдается явления «перезавихривания», что косвенно подтверждается характером изменения кривых С и СО. Эти компоненты имеют тенденцию к снижению с увеличением Ω. Несмотря на то, что концентрации С и СО снижаются с увеличением Ω, значения удельных расходов топлива, эффективного g_e и инднкаторного g_i, возрастают при Ω >3,4. Это может быть объяснено увеличением потерь тепла в стенки и некоторым повышением потерь на газообмен.

Выводы

Выполненные исследования показали, что характеристика впрыска топлива влияет как на экономичность работы двигателя, так и на токсичность отработавших газов. Насос УТН обеспечивает наиболее благоприятные изменения содержания токсичных компонентов в отработавших газах двигателя Д-21А. Подбором диаметра камеры сгорания можно в определенной степени регулировать концентрацию опасных соединений в отработавших газах. Возможно также влиять на экономичность и токсичность дизельных двигателей путем подбора формы всасывающего канала, который должен обеспечивать определенные значения вихревого отношения в камере сгорания. Для каждой формы камеры сгорания эти пределы должны уточняться.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кочетова Ж.Ю. Экомониторинг нефти и нефтепродуктов в объектах окружающей среды: монография. Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2016. 204 с.

2. Сексенбаева Р.Б., Данияров Н.А., Жалгасбеков А.З., Минбаев Ж.С. К вопросу о составе отработавших газов дизелей // Технические науки: теория и практика. Материалы II Междунар. науч. конф. (г. Чита, январь 2014 г.). Чита: Издательство Молодой ученый, 2014. С. 75–77.

3. Кочетова Ж.Ю., Базарский О.В., Бакланов И.О., Маслова Н.В. Влияние загрязнения почв объектов авиационной и космической деятельности на здоровье человека // Экология промышленного производства. 2020. № 4 (112). С. 39–44.

4. Голубев И.Р., Новиков И.Р. Окружающая среда и транспорт. М.: Транспорт, 1987. 207 с.

5. Малов Р.В., Ерохов В.И., Щетинин В.А. Автомобильный транспорт и защита окружающей среды. М.: Транспорт, 1982. 200 с.

6. Якубовский Ю. Автомобильный транспорт и защита окружающей среды. М.: Транспорт, 1979. 198 с.

INSIGHTS INTO EFFECTS OF THERMOTOLERANT NITRIFYING AND SULFUR-OXIDIZING INOCULANTS ON NITROGEN-SULFUR CO-METABOLISM IN SEWAGE SLUDGE COMPOSTING
ВЛИЯНИЕ ТЕРМОТОЛЕРАНТНЫХ НИТРИФИКАЦИОННЫХ И СЕРООКИСЛЯЮЩИХ ИНОКУЛЯТОВ НА АЗОТНО-СЕРНЫЙ КОМЕТАБОЛИЗМ ПРИ КОМПОСТИРОВАНИИ ОСАДКОВ СТОЧНЫХ СТОЧНЫХ ВОД

Tingting Hou*, Yujie Zhou*, Rongchun Du*, Jiali Liu**, Weiguang Li***, Shumei Zhang*, Muzi Li**, Junhong Chu***, Liqiang Meng***

** Institute of Microbiology, Heilongjiang Academy of Sciences, China, Harbin*
*** Hebei University of Environmental Engineering, China, Qinhuangdao*
**** School of Environment, Harbin Institute of Technology, China, Harbin*
(email: mengliqiang83420@163.com)

Abstract: In this study, high temperature thermotolerant nitrifying bacteria (TNB) and high temperature thermotolerant sulfide oxidizing bacteria (TSOB) were obtained from compost samples and inoculated into sewage sludge (SS) compost. The effects of inoculation on physical and chemical parameters, ammonia and hydrogen sulfide release, nitrogen form and sulfur compound content change and physical-chemical properties during nitrogen and sulfur conversion were studied. The results showed that inoculation of TNB and TSOB increased the temperature, pH, OM degradation, C/N ratio and germination index (GI) of compost. Compared with the control treatment (CK), the addition of inoculants reduced the release of NH_3 and H_2S, and transformed them into nitrogen and sulfur compounds, the hydrolysis of polymeric ferrous sulfate was promoted, resulting in relatively high content of sulfite and sulfate. At the same time, the physical and chemical properties of SS have a strong correlation with nitrogen and sulfur compounds.

Аннотация: В этом исследовании термотолерантные к высоким температурам нитрифицирующие бактерии (ТНБ) и термотолерантные к высоким температурам сульфид-окисляющие бактерии (ТСОБ) были получены из образцов компоста и инокулированы в компост из осадка сточных вод (СС). Изучено влияние инокуляции на физико-химические показатели, выделение аммиака и сероводорода, изменение формы азота и содержания соединений серы, а также физико-химических свойств при конверсии азота и серы. Результаты показали, что инокуляция ТНБ и ТСОБ повышала температуру, pH, разложение ОВ, соотношение C/N и индекс всхожести (GI) компоста. По сравнению с контрольной обработкой (КК) добавление инокулянтов уменьшало выделение NH_3 и H_2S, превращало их в соединения азота и серы, усиливался гидролиз полимерного сульфата железа, что приводило к относительно высокому содержанию сульфита и сульфата. В то же время физико-химические свойства СС имеют сильную корреляцию с соединениями азота и серы.

Keywords: Sewage sludge, composting, inoculation, thermotolerant nitrifying bacteria, thermotolerant sulfurized oxidizing bacteria.

Ключевые слова: осадки сточных вод, компостирование, прививка, термотолерантные нитрифицирующие бактерии, термотолерантные сульфуризованные окисляющие бактерии.

1.Introduction

Currently, along with the growth of industrialization and urbanization, the yield of SS in China of a shark rise in the former years (Yang et al., 2022). SS containing a large amount of organic matter (OM), nitrogen, phosphorus and other trace elements is an inevitable coproduct of sewage treatment works (Meng et al., 2017; Zhao et al., 2020). Aerobic composting is a convention, economical and effective method to treat SS. However, SS also contains a large number of toxic substances for instance heavy metals, pathogenic microorganisms, etc., which are detrimental to the circumstances

and human health (Chen et al., 2023). Therefore, appropriate disposal measures must be urgently used to manage a large number of SS. Composting is a wide-ranging used, valid and economical technology that converts SS into safe and stable products under the influence of microorganisms. In the procedure of composting, natural microbial communities play a crucial role in the process of transforming degradable OM into humus-like products (Jiang et al., 2015). However, the quantity of local microorganisms is insufficient or the biodegradability is poor, which often leads to poor compost quality (Xu et al., 2022). Inoculated the compound thermophile bacteria screened from the high-temperature compost of pig manure into the co-compost of pig manure and corn straw, and found that the contents of ammonia nitrogen and nitrate nitrogen in the infected piles increased significantly at the maturity stage, and the activities of cellulase, urease, phosphatase and sucrose were all higher than those of the control group, on top of that etabolic function analysis showed that carbohydrate metabolism increased(Li et al., 2020). At present, it is suggested to expedite the biodegradation of OM, shorten the composting cycle and the efficiency of composting process would be raised by inoculating exogenous microorganisms (Wan et al., 2020). Compared with other SS management methods such as incineration and anaerobic digestion (Chen et al., 2022b), landfill (Cappucci et al., 2020), compost has the merits of minimization, innocuity and resource recovery, and the products of SS compost can regrade as value-added fertilizer for land use (Greff et al., 2022).

Hydrogen sulfide (H_2S) and Ammonia (NH_3) have been proved to be the two major gases of compost odor (Hu et al., 2015; Rincón et al., 2019). NH_3 is mainly produced by ammoniacal nitrogen produced by the biodegradation of nitrogen-containing OM. Ammonia emissions not only make the compost environment stink, but also reduce the fertilizer value of compost products. In the mesophilic phase of composting, the intensive activity of microorganisms expends a large number of oxygen gas, and there are a lot of hypoxia or anaerobic areas within the pile. In this environment, sulfate-reducing bacteria will revert high-valent sulfate to H_2S or other sulfur-containing odor, and the inperfect biodegradation of sulfur-containing OM also promotes the grow up of sulfur-containing odor in the stack (Chen et al., 2022a). Even though the release of sulfur-containing odor is not as equal to high as NH_3, its odor threshold is generally low, for example, H_2S is only 0.0005 ppm, while NH_3 is 0.15 ppm (Han et al., 2019). The low odor threshold purports that the odor density dedicate rate is high, and human health is threatened. Previous research reports (Awasthi et al., 2022; Peng et al., 2023) lay particular attention to the control methods of compost odor gas, mainly including the optimization of process parameters (such as O_2, pH, C/N, etc.), the use of additives (such as bulking inoculants, chemical inoculants, adsorbents, compost clinker, etc.), and inoculation of exogenous microbial inoculants. The adjustable range of composting process conditions is very limited, and usually only one kind of gas can be controlled. Adding bulking inoculants and other additives may cause secondary pollution. As a biodegradation process relying on microorganisms, composting may be more direct and effective from the perspective of microbial community control (Meng et al., 2018), but the current research is only limited to the use of a single bacterial group to control a certain type of odor.

NH_3 mainly comes from the nitrogen-containing OM in SS, which is produced throughout the composting process and mainly released at high temperature. After the start of composting, the rich nitrogenous OM in the material will be converted into ammonia nitrogen ($NH4^+$- N) by bacteria through ammonia assimilation. Nitrification is a reaction step that accelerates the transform of ammonium nitrogen to oxidized nitrogen (NO^{2-}, NO^{3-}), which is expected to downgrade ammonia volatilization (Wang et al., 2019). Research shows that adding microbial inoculants with TNB may become a method to maintain nitrogen in the pile (Zhang et al., 2016). Li et al. (2021) added the same inoculant to compost materials with different initial moisture content (MC), and found that the total nitrogen of inoculant treatment increased by 13.01~22.10%, while the CK decreased by 7.76%. H_2S mainly comes from sulfur-containing OM in SS (such as cysteine metabolism), which is released in a large amount in the mesophilic phase of composting. It is caused by the anoxic or anaerobic environment in the pile. Oxidized sulfur ions will be reduced to H_2S and other volatile sulfur compounds (VSCs) and released. Chen et al. (2011) reported that more than 14% oxygen supply in SS compost can reduce the production of H_2S. TSOB can oxidize low-valent reducing sulfides (such as HS^-, H_2S, etc.) to generate high-valent sulfur compounds, thus reducing the sulfur odor. Previously,

the use of TSOB to control H_2S gas has been widely used in the field of water treatment, such as the application in the treatment process of biological filter. The application of an acidophilic thiobacillus in the two-phase bioreactor can remove more than 97% of the inlet H_2S gas (Sameri et al., 2022); The waste gas carbon biological filter loaded with TSOB was found to have a treatment efficiency of more than 90% for H_2S (Jiang et al., 2008). The application research of TSOB bacteria in composting system is relatively small.

In this study, the enriched TNB and TSOB isolated from SS compost samples were used as inoculants to inoculate SS compost, and the effects of inoculating exogenous microorganisms on the physical and chemical properties and nitrogen and sulfur compounds during composting were discussed. The purpose of this study is to (1) Carry out comparative experiments under the optimal dosing conditions, and analyze the results of conventional indicators of compost, including temperature, pH value, oxygen concentration, moisture content and seed germination rate of compost samples; (2) Be in progress comparative experiments to investigate the effects of TSOB and TNB on nitrogen and sulfur compounds; (3) Evaluate the correlation between nitrogen, sulfur compounds and physical and chemical properties in SS composting process.

2. Materials and methods

2.1. Preparation of bacterial inoculants

The bacteria used in the composting experiment are TNB and TSOB screened from the common composting samples of municipal sludge and mushroom debris (Chen et al., 2022a; Zhao et al., 2022), There are 3 thermotolerant nitrifying bacteria (belonging to Streptomyces, Gordonia, Brevibacillus) and 3 thermotolerant sulfur-oxidizing bacteria (belonging to Paenibacilli and Cohnella). All media are sterilized at 121 ℃ for 30 minutes before use. The same treated sterile water is also used when adjusting the water content in composting experiment.

2.2. Composting materials and steps

The municipal SS & rice husk (RS) conditioner used in the composting experiment were taken from the SS treatment room of an environmental protection group. The fundamental physical and chemical parameters of the two materials are shown in Table 1. Before composting begins, the SS and RS shall be well-mixed with a dry weight ratio of 3:1, and the MC of the pile shall be adjusted to about 60%. The main body area of composting reaction is a double-layer cylinder, and the effective volume of the reaction area is about 18L, which Meng et al. (2017) has described previously. The water content of each reactor is regulated to 60% - 65% pass through adding sterile water. During the experiment, keep the water bath temperature above 5℃ below the reactor temperature. The air is pumped into the reactor by air pump, and the flow meter controls the aeration rate of 0.2 L/min. The discharged gas first absorbs NH_3 in the tail gas through boric acid absorption solution, and then absorbs H_2S gas through NaOH absorption solution to ensure the basic air quality of the experimental environment.

Table 1 – Physicochemical characteristics of the raw materials.

parameter	SS	RS
MC （%）	72.16±0.07	5.73±0.03
pH	3.64±0.02	5.36±0.01
VOC （%）	46.88	81.59
TOC （%）	21.02±0.04	35.37±0.17
TON （%）	3.50±0.02	1.01±0.01
TOS （%）	1.37±0.01	0.56±0.16
C/N	6.01±0.04	35.02±0.18

2.3 Compost sampling and experimental design

All SS experiments lasted for 20 days, and samples were taken on Day 0, 3, 6, 10, 15 and 20. The compost samples were preserved at 4℃, and the determination of all basic physical and chemical indicators was completed within 3 days.

The pretreatment process of compost samples is as follows: take about 10g of fresh samples into a 250 ML conical flask, add 100 ML of deionized water (sample: deionized water=1:10 mass ratio), seal the conical flask, place it in a 120 r/min, 40℃ shaking table for 2 hrs, and then centrifuge the mixture at a speed of 10000 r/min for 5 minutes, and the supernatant was collected at 0.45 μmol/L of organic filter membrane to give the extract. The extract is used to determine pH value, ammonia nitrogen, nitrate nitrogen, nitrite nitrogen, hydroxylamine, sulfate, sulfite and seed germination rate. The composition of the two tests is as follows: (1) The CK does not add the compound bacterial inoculants. (2) The dosage of inoculation group (TR) is 4%, the dosing time is 55h, and the dosing ratio (nitrate/sulfur) is 1.3.

2.4 Physical and chemical analysis

During the mesophilic phase of composting because of the intense reaction, the temperature changes greatly. The temperature of the pile is recorded every 12 hrs, and the temperature changes slowly when the pile matures in the later stage. The temperature of the pile is recorded every 24 hrs. The MC of compost samples was determined by gravimetric method. Take the filtered extract and measure the pH value with a pHS-3E pH meter. Take about 10g of fresh samples in a glass culture dish, and dry them in a 105℃ oven to constant weight. The difference in mass before and after the drying is the MC. Take the samples that have been dried after the MC determination and grind them to powder, and burn them in a muffle furnace at 550℃ for 2hrs. After cooling, take them out and weigh them. The difference in mass before and after the burning is the content of volatile OM. The content of C, N and S elements in the sample was determined by element analyzer (Vario EL, Germany). Chinese cabbage seeds were used to determine GI of compost samples. Incubate in the dark for 3 days at 20℃. Take deionized water as the control, and set three parallels for each sample. After 3 days, the number of germinated seeds and the root length of seeds were measure, and the GI value were calculated.

2.5 Detection of volatile gas in SS composting

A portable pump gas detector (Shenzhen Yuante Technology Co., Ltd., SKY2000-M3-1) is used to detect the contents of O_2, NH_3, H_2S and NO above the reactor from the gas detection port on the upper apex of the reaction vessel. The gas that the experiment focuses on includes O_2, NH_3 and H_2S. The gas content is measured every 12 hrs in the mesophilic phase of composting, and the reaction speed slows down with the decrease of OM in the thermophilic phase. The detection frequency is changed to be measured every 24 hrs.

The NH_3 concentration is titrated by the boric acid absorption solution in the gas collection system of the composting reactor to calculate its cumulative release concentration. Take boric acid at a mass fraction of 2% was used as the absorption solution, add 1ML of methyl red bromocresol green mixed indicator (0.2% methyl red ethanol solution:0.1% bromocresol green ethanol solution =1: 3) to each liter of boric acid. The boric acid absorption solution is replaced every 24 hrs. At the same time, 10ML of absorption solution sample is taken and titrated with 0.05mol/L hydrochloric acid solution. The absorption solution at terminate titration changes transition from green to pink.

2.6 Detection of nitrogen and sulfur compounds during SS

The content of ammonia nitrogen was measured by Nessler's inoculants spectrophotometry. In the presence of ethanol and sodium carbonate, the hydroxylamine reacts quantitatively with excess 8-hydroxyquinoline to form the stable 5,8-quinolinequinone 5- (8-hydroxy-5-quinoline imine), which has the maximum absorption peak at 705 nm wavelength. The compound complies with beer's law in the 0-0.05 mmol / ML solution range. Nitrous nitrogen content was determined by diazo coupling spectrophotometry. The content of nitrate nitrogen was determined by ultraviolet spectrophotometry. Nitrous oxide uses gas chromatography to collect the compost tail gas and send it to Shimadzu gas chromatograph (GC-2010 Plus). The ECD detector is used. Each injection volume is 5 ML, and the operation time is 10 minutes. The reducing sulfide in the sample was determined by methylene blue

spectrophotometry (HJ833-2017). Sulfite content was determined by formaldehyde absorption-pararosaniline hydrochloride spectrophotometry. The sulfate content was determined by modified barium sulfate turbidimetry.

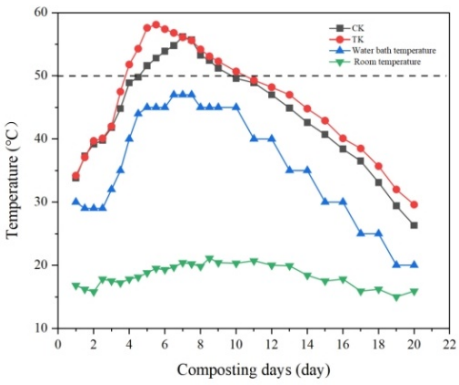
2.7 Data analysis

All physicochemical data analysis in this study shall be repeated at a minimum three times. SPSS 19.0 and Excel 2020 software are used to process and analyze the data. $p<0.05$ is the significant difference level. All charts in this study were drawn using Origin 2021.

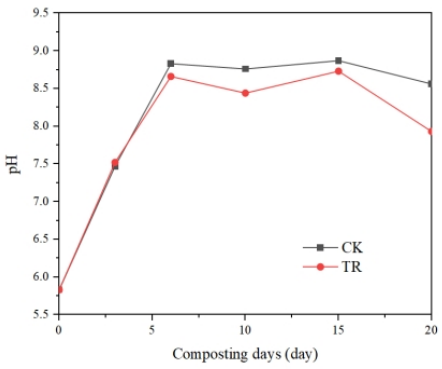
3. Results and discussion

3.1 Effect of inoculation on basic physical and chemical characteristics

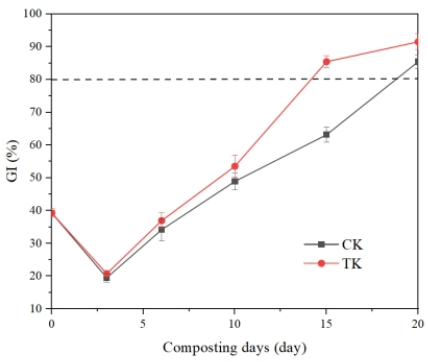
Temperature is one of the important indicators of composting process and not only reflects the stability and microbial activity of composting system (Meng et al., 2017), but also is one of the factors affecting gas release. The compost environment temperature was maintained between 15~21℃, and the compost body temperature was markedly elevated, and the temperature of the inoculation treatment (TR) was accelerated after the addition of bacterial inoculants. The TR and the CK entered thermophilic phase (above 50 ℃) on the 4th and 5th day, respectively. The TR reached the maximum temperature of 58.1 ℃ on the 5th day, and the CK reached the maximum temperature of 56.2 ℃ on the 7th day (Fig. 1a). The microorganism degrades the OM and generates heat to cause high temperature. High temperature can effectively eliminate pathogenic microorganisms, pests, insect eggs, weed seeds and other harmful substances, and promote compost decomposition. Thermophilic phase of the TR lasted for 7 days, while that of the CK lasted only 5 days. The temperature of TR during the subsequent ripening period was also slightly higher than that of CK. The results showed that the bacterial inoculants contributed could make the pile enter thermophilic phase in advance, increase the temperature spike and extend thermophilic phase. This phenomenon indicates that the external inoculants promote the degradation of OM, thus generating more heat, and further indicates that the external inoculants are conducive to improving the micro-organisms activity in the pile (Yu et al., 2019b).



a)



b)



c)

Figure 1 — The variations of (a) temperature, (b) pH value, (c) moisture content (%), (d) oxygen concentration, (e) Germination index (GI) (%) in two treatments during composting.

The pH value can not only indicate the maturity of the pile and reflect the microbial activity (Jiang et al., 2015), but also an important the key factors affecting the generation of NH_3 or H_2S odor. The pH value of CK and TR have changed with time during the SS composting experiment is shown in Fig. 1b. The two groups of pH value of piles increased rapidly within 0-6 days and then tended to fluctuate steadily. Both the CK and the TR reached the highest pH values of 8.87 and 8.73 respectively on the 15th day, at the end of composting the CK and the TR of pH values were 8.56 and 7.93 respectively. The research shows that the disintegrate of protein OM in compost will produce a great quantity of ammonia nitrogen, which will cause the rise of pH value. After that, owing to the determination of low molecular weight aliphatic acids and a certain degree of nitrification and nitrification, the pH value will decline slightly, which is consistent with previous research conclusions (Li et al., 2021; Zhao et al., 2022). It is worth noting that the pH value of the TR has been lower than that of the CK since the 6th day of composting, and has decreased significantly on the 20th day. The lower pH value has a certain contribution to the reduction of NH_3 release. Gu et al. (2018) also found that the pH value of the pure inoculation group was lower than that of the CK in the experiment of co-composting chicken manure and mushroom debris with Thiobacillus thioparus. T. thioparus has been identified as a fine bacterium capable of oxidizing organic and inorganic sulfur compounds; The study of Bao et al.(2022) also showed that the pH value of the TR after adding exogenous bacteria was low.

The change of water content in the compost with time is shown in Fig. 1c. It can not only be used as a nutrient carrier for microbial metabolism and physiological activities in the composting process, but also closely related to the composting process (Guo et al., 2012). The water content of the two groups of compost continued to decline with the composting process, and the water content decreased rapidly in thermophilic phase (3~10 days); The water content of the CK and the TR decreased from the initial 62% to 49.53% and 48.51% respectively at the end of composting. This is because in mesophilic phase of composting, microbial metabolism is accelerated, intense microbial activity leads to a large amount of water consumption, and high temperature also leads to rapid evaporation of water, so the water content in thermophilic phase decreases rapidly. In addition, the water content of the TR decreased faster during thermophilic phase. In the whole process, its water content was lower than that of the CK, but the difference was not significant (p<0.05). The experimental results of Wang et al. (2022) showed that under the same composting or static composting operation conditions, the water content of TR with microorganisms was lower than that of CK. The results show that the addition of bacterial inoculants may accelerate the consumption of water in the pile.

As shown in Fig. 1d, the oxygen content can reflect the active state of microorganisms in the reactor, and is also one of the important factors affecting the release of NH_3 and H_2S. Because aerobic microorganism degrades OM and consumes oxygen, the oxygen concentration of the two groups of composts decreases rapidly at the beginning of composting, and reaches the lowest value on the fourth day, at which time the oxygen concentration can hardly be detected by the gas detector; From the fifth day, the oxygen concentration began to increase and gradually reached the environmental level. This trend is similar to the oxygen monitoring results of Yuan et al.(2015) using kitchen waste compost. After 15 days of composting, the oxygen content of each treatment reached the normal level, and the oxygen content of each treatment was significantly negatively correlated with the temperature (p<0.001). When the compost temperature was close to the ambient temperature, the oxygen content recovered to 21%. Interestingly, the oxygen content of the TR in this experiment is slightly higher than that of the CK in thermophilic phase, which may be due to the fact that the added sulfur-oxidizing bacteria can use part of NO^{3-} as electron acceptor for microbial activity under anaerobic conditions, thus reducing the consumption of oxygen in the reactor, but there is no significant difference in oxygen content between the two groups (p<0.05).

Seed germination index (GI) is an important indicator of compost plant toxicity, and is often used to characterize the maturity of compost materials. When GI>50%, the pile is basically non-toxic, and when GI>80%, the pile is basically rotten (Wang et al., 2017). The change of GI value of leachate from two groups of compost samples with time during SS composting is shown in Fig. 1e. The GI

value of the two groups of samples decreased slightly at the beginning of composting, and then increased continuously. The GI value of the TR was higher than that of the CK; The GI value of the TR was more than 80% on the 15th day, indicating that it was basically rotten, and the CK reached the standard on the 20th day; At the end of composting, the GI value of the CK and the TR increased from 39.29% to 85.43% and 91.52% respectively. According to previous research reports, the phenomenon of higher GI value and earlier maturity of materials was observed when the enriched TSOB and TNB were added to the municipal sludge aerobic compost separately (Temel, 2023; Zhao et al., 2022); Similar results were obtained by adding thermotolerant cellulose degrading bacteria during rice straw composting (Guo et al., 2012).

3.2 NH_3 and H_2S emissions

NH_3 is the main cause of nitrogen loss during composting, and also the main odor released during composting. The change of NH_3 concentration above the pile measured by the gas detector every day during the SS composting process is shown in Fig. 2a. Because the range of the detector is 0~500ppm, the meter burst occurred on the 7th to 9th day of the experiment. The daily cumulative release of NH_3 obtained from boric acid titration during composting and the change of NH_3 cumulative release over time during the whole process of composting are shown in Fig. 2b. The NH_3 emission of the two groups of piles is relatively small at the initial stage of composting. NH_3 is mainly released in large quantities during thermophilic phase of the pile (the 4th to 10th days). The daily cumulative release of CK and TR reaches the peak on the 7th day, which is 263.22mg and 160.04mg respectively. This is due to the strong biodegradation of organic nitrogen to inorganic nitrogen. At this time, microorganisms decompose nitrogen-containing organics to produce a large amount of NH_4^+, which is converted into NH_3 volatilization under high temperature and high pH conditions. Subsequently, due to the consumption of easily degradable OM, microorganisms began to decompose cellulose and other refractory substances, the temperature decreased, and ammonia assimilation and nitrification increased, and NH_4^+began to be converted into biological nitrogen, NO_2^- and NO_3^-, so the release of NH_3 gradually decreased. This NH_3 emission mode has been reported in many studies (Szanto et al., 2007).

As can be seen from Fig. 2, the NH_3 concentration in the TR is almost always lower than that in the CK except for the burst period, and the CK enters the burst period earlier than the TR. Similar results were also obtained in Fig. 2b. During the whole process of composting, the cumulative release of NH_3 in the CK was 1847.80mg, and the cumulative release of NH_3 in the TR was 1265.29mg, which was 31.52% lower than that in the CK. This may be because the addition of bacterial inoculants promoted the conversion of ammonia nitrogen in the composting process. Zhao et al (2020) added enriched TNB to municipal SS compost at a mass ratio of 5% to obtain 42% of NH_3 control amount.

During SS composting, the H_2S concentration above the pile and the change of concentration accumulation measured by the gas detector every day are shown in Fig. 2c. The release of H_2S from the two groups of reactors was concentrated on the 2nd to 7th days, with a peak concentration on the 4th to 6th days, and then dropped sharply. Research shows that most H_2S gas is released at the early stage of composting. According to the composting experiment of kitchen waste, 80% of H_2S gas is released in the first 6 days, which is consistent with many research results (Yuan et al., 2015; Zhang et al., 2013). The maximum concentration of H_2S in the CK reached 18.69 ppm on the 6th day, and the maximum concentration of H_2S in the TR reached 11.91 ppm on the 5th day. After adding TSOB and TNB, the concentration of H_2S in the TR was significantly lower than that in the CK. The difference in the cumulative release concentration of H_2S between the two groups was 44 ppm, and the cumulative reduction rate of H_2S in TR was 48.82%, which showed that the addition of two types of functional bacteria could reduce the release of H_2S odor. According to the report (Gu et al., 2018), adding Thiobacillus thiooxidans 1904 with a mass ratio of 5% in chicken manure can reduce the cumulative H_2S emission by 33.24%. Chen et al (2022b). added a heat-resistant sulfur-oxidizing bacterium Cohnella thermopolerans LYH-2 to the municipal SS compost to achieve 35.4% H_2S removal rate.

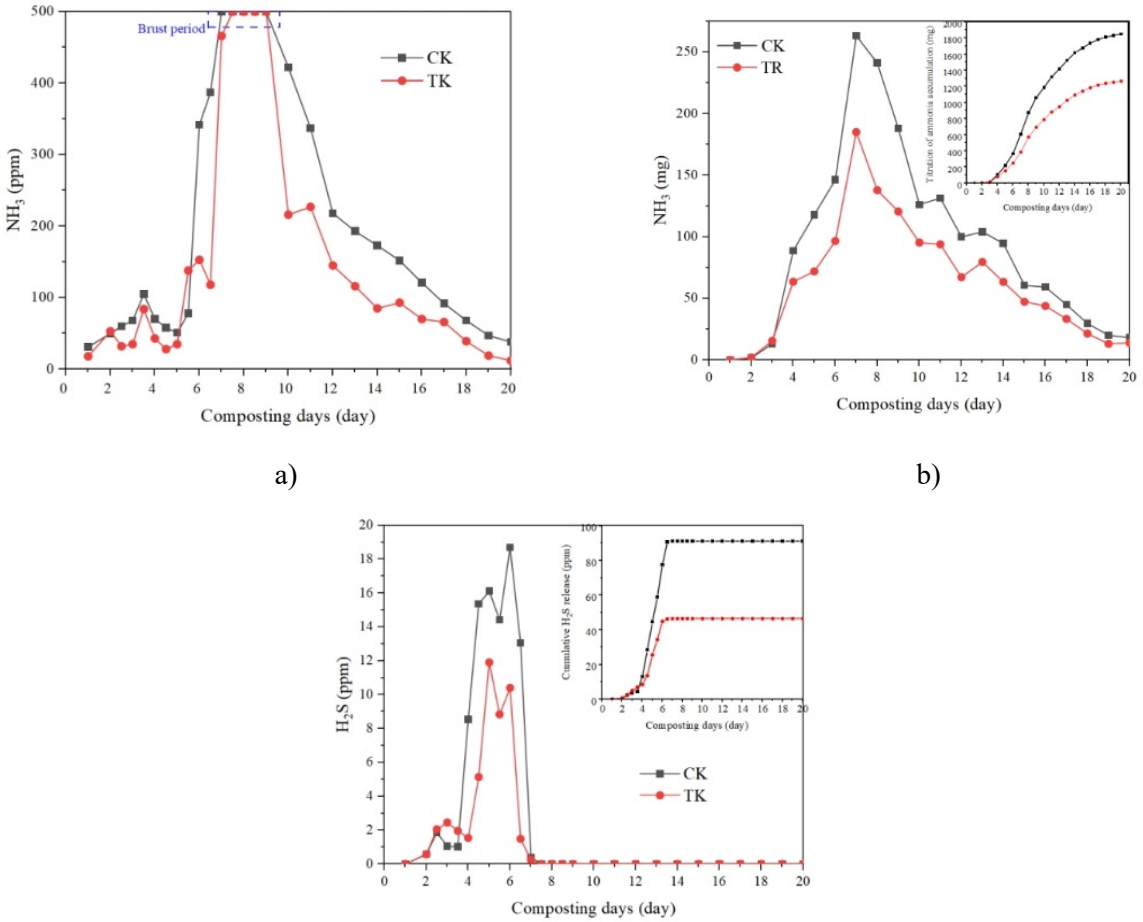


Figure 2 – Changes of NH_3 concentration（a), NH_3 daily cumulative release (b) and H_2S concentration cumulative (c) amount with time during sludge composting.

3.3 Changes of nitrogen forms during SS composting

The change of ammonia nitrogen (NH_4^+-N) and nitrate nitrogen (NO_3^--N) content with time during composting is shown in Fig. 3a. The NH_4^+-N content of the two treatments increased rapidly at the early stage of composting, reaching the highest value of 5409.50mg/kg and 5232.86mg/kg respectively on the sixth day, and the NH_4^+-N content decreased slightly and showed a stable fluctuation trend after the sixth day. The rapid increase of ammonia nitrogen in the early stage of composting is due to the biodegradation of a large amount of easily degradable nitrogen-containing OM, which is the first step of compost degradation, and is similar to the results reported by many previous studies (Yu et al., 2019a); Ammonification occurs during the whole composting process. In the later stage, with the microbial assimilation and nitrification of ammonia nitrogen, ammonia nitrogen will not continue to increase. It is worth noting that the NH_4^+-N content of the TR has been significantly lower than that of the CK after the addition of TNB and TSOB (P=0.06), which may be because the added bacterial inoculants promote the conversion of NH_4^+-N to other forms of nitrogen, thus achieving the effect of reducing NH_3 release. NH_4^+-N can be converted into nitrate nitrogen (NO_3^-N) through nitrification and nitrification. The change of NO_3^-N content with time during SS composting is shown in the dotted line. The content of NO_3^-N in the two groups of piles did not change significantly during the whole composting process, indicating that the nitrification in the pile was weak.

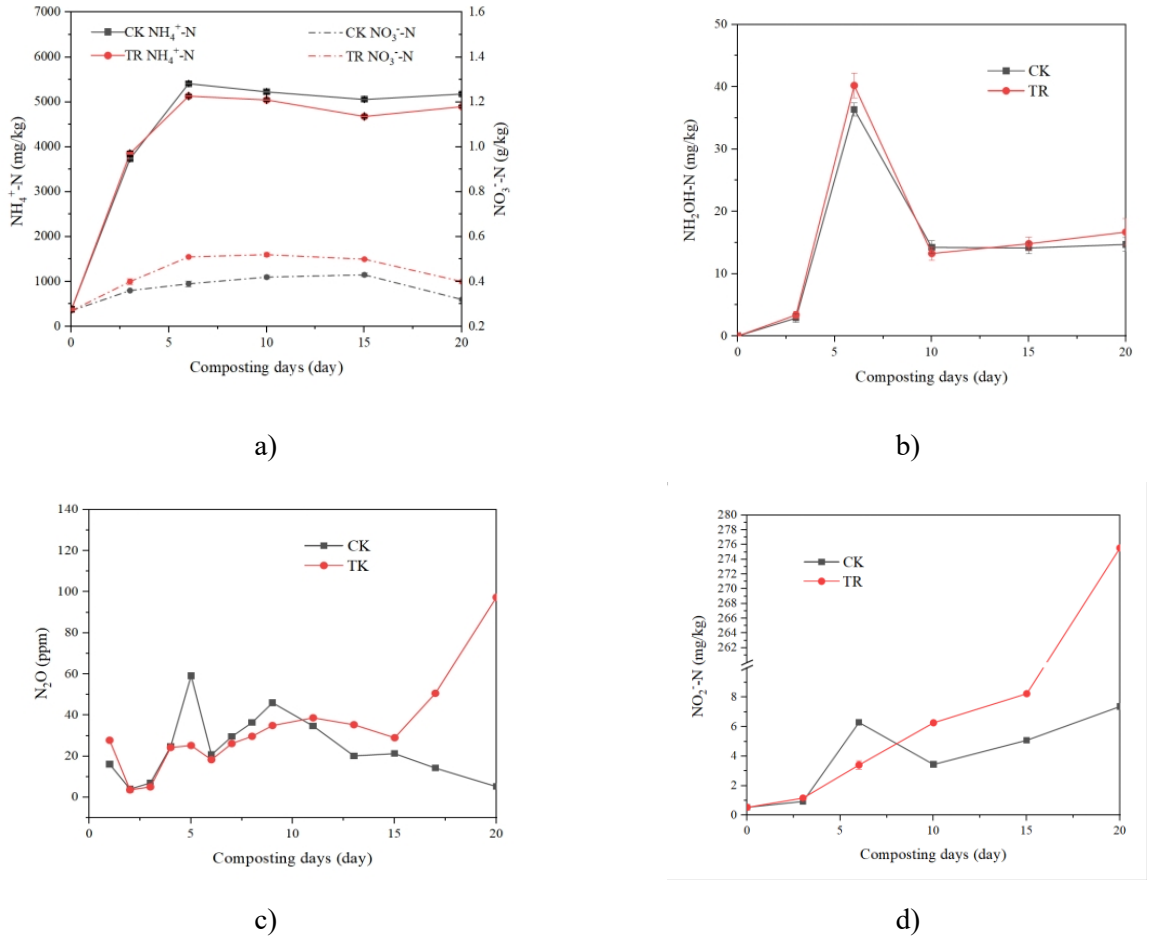


Figure 3 — Ammonia nitrogen and nitrate nitrogen content (a); Hydroxylamine nitrogen content (b); Nitrous nitrogen content (c); Change of nitrous oxide content (d) with time in sludge composting process.

The CK and the TR had the highest concentrations of 0.43 g/kg and 0.52 g/kg on the 15th and 10th day respectively. At the end of composting, the NO_3^-N content of the CK and the TR were 0.32 g/kg and 0.40 g/kg respectively. The research shows that (Liu et al., 2019; Liu et al., 2020), thermophilic phase will lead to the inactivation or death of many thermotolerant intolerant microorganisms, and with the reduction of the content of degradable OM in the material, the nitrification of the two treatments will gradually weaken, the content of NO_3^-N will also start to decrease, and the occurrence of denitrification in the pile will also consume nitrate.

The figure shows that the content of nitrate nitrogen in the TR has been slightly higher than that in the CK. It may be that the TNB have played a certain role in strengthening, but not significantly (p<0.05). Jiang et al. (2015) think that the higher nitrate nitrogen may be due to the existence of high-temperature resistant and nitrifying microbial population in the pile. The difference in the concentration of NO_3^-N between the two groups after the bacterial inoculants was added was between 70 and 100 mg, less than the difference in the concentration of NH_4^+-N between 181 and 380 mg, accounting for only about 1/3 of the decrease in NH_4^+-N. Therefore, the effect of reducing NH_3 volatilization by TNB through nitrification was limited. This may be due to the fact that the external inoculants also enhance the ammonia assimilation, convert NH_4^+-N into biological nitrogen, and further reduce the conversion of NH_4^+-N to NH_3, because there is the possibility that some inoculants will become carbon sources after entering the pile, which will further enhance the ammonia assimilation of the compost (Namgung et al., 2012).

In the process of SS composting, the degradation of nitrogen-containing OM will first produce ammoniacal nitrogen through ammoniation. When ammoniacal nitrogen undergoes further nitrification, it will first be oxidized to hydroxylamine (NH_2OH) by ammonia monooxygenase

(AMO), then oxidized to NO_2 through hydroxylamine oxidase (HAO), and finally oxidized to NO_3. Hydroxylamine nitrogen is an important intermediate product in the process of ammoxidation, and its content is shown in Fig 3.b. The trend of hydroxylamine nitrogen change and content in the two groups of piles is similar, both of which increase rapidly, then decrease, and then tend to be stable. The content of hydroxylamine nitrogen in the CK and the TR reached the peak on the 6th day, 36.36 mg/kg and 40.22 mg/kg respectively. As the intermediate product of ammoxidation process, hydroxylamine nitrogen has a fast conversion rate, its content is not high and there is no significant difference, and it is also possible that the inoculant does not significantly enhance the ammoxidation effect; From the 10th day to the 20th day of composting, the hydroxylamine nitrogen in the TR showed a slow rising trend. Recent literature showed that (Yang et al., 2016), hydroxylamine was closely related to the production of greenhouse gas N_2O.

Nitrous nitrogen (NO_2^-N) is also one of the key intermediate products in the nitrogen conversion process. It is produced in both nitrification and denitrification reactions. The change with time is shown in Fig 3.c. The content of NO_2^-N in the two groups of composts showed a gradual upward trend. The content of NO_2^-N in the TR was lower than that in the CK on the 6th day of composting, which may be because the TSOB used NO_3 as the electron acceptor, and the consumption of NO_3 promoted the conversion of NO_2^-N to NO_3-N. The research shows that(Liu et al., 2021), whether heterotrophic denitrification or sulfide autotrophic denitrification, because nitrate reductase is more competitive than nitrite reductase, NO_3^- is a better electron acceptor rather than NO_2. The content of NO_2^-N in the CK increased slowly to 7.37 mg/kg at the end of composting. However, it is noteworthy that the content of NO_2^-N in the TR increased sharply from the 15th to the 20th day of composting, reaching 275.55 mg/kg at the end of composting. Combined with the detection results of N_2O in compost during this period and the decline trend of nitrate nitrogen content, it is shown that the TR has a strong denitrification reaction in the reactor.

Although NH_3 volatilization is the main way of nitrogen loss during composting, denitrification will occur in the compost under anoxic conditions, and nitrate nitrogen will be converted into N_2O, NO, N_2, etc., which will also lead to nitrogen loss, and aerobic denitrification has also been reported (Tan et al., 2020). Among them, nitrous oxide (N_2O) is a greenhouse gas, and its single molecular warming potential is 298 times that of CO_2. The change with time is shown in Fig3d. The N_2O release concentration of the two groups gradually increased 9 days before composting, and the concentration of the TR has been slightly lower than that of the CK, indicating that the addition of bacterial inoculants has a certain control effect on nitrous oxide during this time period. The study found that (Yang et al., 2016) high S/N also plays an important role in reducing the release of N_2O in the sulfur-based autotrophic denitrification system, so the inoculation may reduce the volatilization of sulfur. The N_2O concentration in the CK gradually decreased after the thermophilic phase, and the N_2O concentration in the CK decreased to 6 ppm at the end of composting, which may be due to the gradual weakening of denitrification with the increase of oxygen concentration; However, the N_2O concentration in the experimental group only decreased slightly from the 13th to the 15th day of composting, and increased sharply from the 15th day. At the end of composting, the N_2O concentration in the TR reached 98 ppm. These changes were consistent with the sharp increase of NO_2^-N in the later stage of composting.

Many previous studies (Jiang et al., 2016; Yu et al., 2020) reported that N_2O emissions increased during the phases of composting. However, with the degradation of OM in the later stage of composting, C/N decreased, carbon source was insufficient, and the increase of NO_3 would promote the heterotrophic denitrification. This phenomenon in the TR may be caused by its C/N being significantly lower than that in the CK. Although N_2O emission is an adverse phenomenon in composting, it may reflect the result of early composting in the TR from the side. Therefore, it can be considered to reduce the composting time after the addition of inoculants to save costs for the aerobic composting process.

3.4 Changes of SS compounds during sludge composting

The change of reducing sulfide content with time during SS composting is shown in Fig. 4a. The content of reducing sulfide in the two groups of composts increased rapidly at the initial stage of

composting, then decreased rapidly, and tended to be stable at the middle and late phases of composting. The content of reducing sulfide in the CK and the TR reached the highest value of 32.46 mg/kg and 23.80 mg/kg on the 6th and 3rd day respectively. This is because at the mesophilic phase of composting, microbial activities lead to oxygen consumption, and there is a large amount of anaerobic or anoxic environment in the pile. At this time, sulfate-reducing bacteria can reduce high-valent sulfur compounds, and sulfur-containing OM is more converted to reducing state after being decomposed by microorganisms (Zhu et al., 2021). From the sixth day, the reducing sulfide content in the TR was lower than that in the CK. The content of reducing sulfide in the TR was only 8.34 mg/kg on the sixth day, and there was a significant difference between the two groups (p<0.05). This shows that the addition of two types of functional bacteria does enhance the oxidation of reducing sulfide. Without additional oxygen, it is speculated that NO_3 provides the electronic receptor required for the activity of TSOB (Plas et al., 1992; Read-Daily et al., 2011); Less reducing sulfide may mean less H_2S release, which further corroborates the detection results of H_2S concentration, indicating that the addition of bacterial inoculants has certain control effect on H_2S.

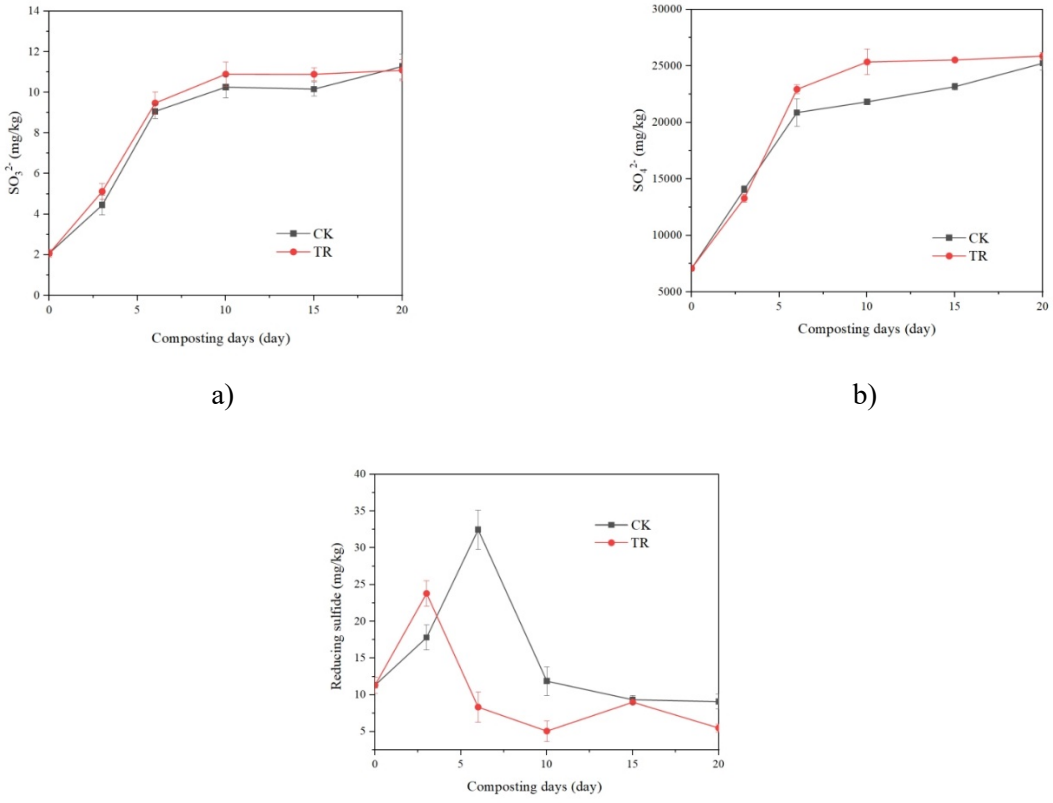


Figure 4 — Reducing sulfide (a); Sulfite (b); sulfate content (c) change of with time During sludge composting SO_3^{2-} is one of the intermediate products of the sulfur oxidation process.

The change of its content in the SS composting process is shown in Fig. 4b. The content of SO_3^{2-} in the two groups of reactors increased rapidly from 0 to 6 days, and then increased slowly. At the mesophilic phase of composting, microorganisms oxidize and decompose sulfur-containing OM (mainly protein), and the content of SO_3^{2-} in the compost begins to increase significantly; In the cooling phase, cellulose is mainly decomposed, the degradation of protein is reduced, and the content of SO_3^{2-} is gradually stable. As an intermediate product, the content of SO_3^{2-} has been low. The content of SO_3^{2-} in the CK and the TR at the end of composting is 11.28 mg/kg and 11.09 mg/kg respectively. It can be noted that during the composting process, the SO_3^{2-} content of the TR has been slightly higher than that of the CK, which may be due to the weak effect of TSOB, but there is no statistically significant difference between the two groups (p>0.05).

If the TSOB use NO_3^- as the electron acceptor when the reactor is anoxic, it is expected that the reducing sulfide will be oxidized to non-volatile ionic state in time to reduce the release of H_2S. SO_4^{2-} is the highest valence state of sulfur compounds, and its content changes with time during SS composting process as shown in Fig. 4c. The content of SO_4^{2-} in the two groups of piles increased rapidly from the 0th to the 6th days, and then increased slowly. Different from SO_3^{2-} content, the SO_4^{2-} content in the pile has been kept at a high concentration level. This is because when the sewage plant dewaters the sludge, poly ferrous sulfate will be added as the coagulant for pretreatment. The initial content of SO_4^{2-} in the raw material is high. After the start of composting, poly ferrous sulfate will gradually hydrolyze, so the TR and the CK have the same rapid rising trend. The increase in the late stage of composting may be due to the slow hydrolysis rate of polymeric ferrous sulfate, and the increase of SO_4^{2-} at this level cannot be achieved by simple sulfur oxidation. Since the sixth day, the concentration of SO_4^{2-} in the TR has been higher than that in the CK. The difference between the concentration of SO_4^{2-}-S in the TR and that in the CK is between 685 and 1177 mg/kg. Since the cumulative concentration of H_2S in the two groups only differs by 44 ppm, the difference may be caused by the lower pH in the TR, which is more conducive to the hydrolysis of polymeric ferrous sulfate.

3.5 Correlation of physical and chemical indexes in SS composting process

The results of Spearman correlation analysis between the 10 key physical and chemical indicators are shown in Fig.5 (red and blue respectively represent positive and negative correlation, the size and color depth of the dots represent the size of the correlation, and the significance level is represented by "*" in white).

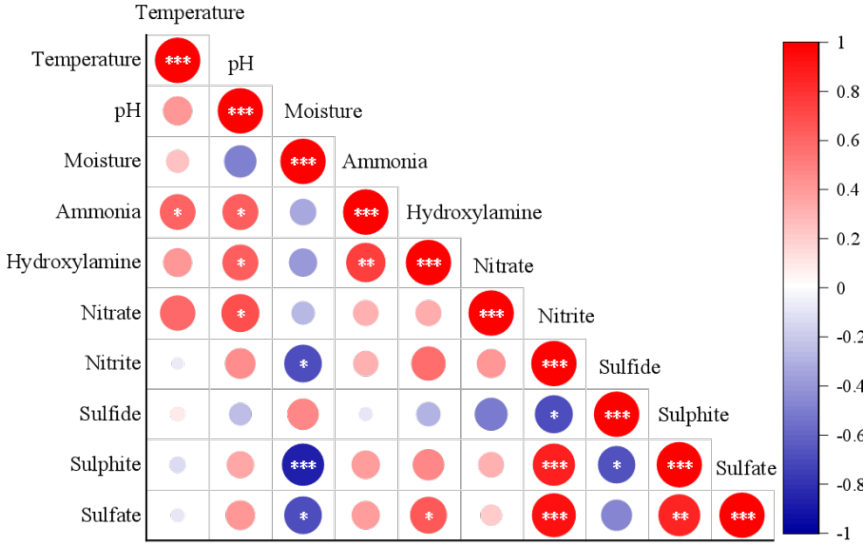


Figure 5 – Spearman correlation analysis of key physical and chemical indicators during sludge composting (*p<=0.05 **p<=0.01 ***p<=0.001)

Water content is negatively correlated with all ionic indexes except reducing sulfide, and pH is positively correlated with all ionic indexes except reducing sulfide; There was a statistically significant positive correlation between ammonia nitrogen and hydroxylamine nitrogen (p<0.01), indicating the occurrence of ammonia oxidation; Nitrite has a very significant positive correlation with sulfite and sulfate (p<0.001), while nitrate has no significant positive correlation with the two, which may reflect the process of nitrate as the electron acceptor of sulfur oxidation reaction, There is a negative correlation between reducing sulfide and sulfite and sulfate, and there is a statistically significant positive correlation between sulfite and sulfate (p<0.01).

4. Conclusion

In this study, the addition of TNB and TSOB promoted the metabolic activity of microorganisms in the compost and improved the maturity of compost samples. Compared with CK, the addition of inoculants reduced the content of nitrogen compounds and promoted the conversion of reducing sulfide during the mesophilic phase. In addition, combining with the relevant analysis

results, it was found that the inoculation of bacteria proved that the basic physical and chemical indexes of compost were strongly correlated, which would help to reduce the emission of NH_3 and H_2S.

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgments

This work was financially supported by the Wild Goose Array Special Projects (2023STYZ002) , Heilongjiang Provincial Research Institute Project (2022SSKY003), and Pre-research Project of Heilongjiang Academy of Sciences (YY2020SW01).

REFERENCES

1. Awasthi, M.K., Liu, H., Liu, T., Awasthi, S.K., Zhang, Z. 2022. Effect of biochar addition on the dynamics of antibiotic resistant bacteria during the pig manure composting. Sci Total Environ. **814**, 152688.

2. Bao, J., Lv, Y., Qv, M., Li, Z., Li, T., Li, S., et al. 2022. Evaluation of key microbial community succession and enzyme activities of nitrogen transformation in pig manure composting process through multi angle analysis. Bioresource Technol. **362**, 127797.

3. Cappucci, G.M., Avolio, R., Carfagna, C., Cocca, M., Gentile, G., Scarpellini, S., et al. 2020. Environmental life cycle assessment of the recycling processes of waste plastics recovered by landfill mining. Waste Manage. **118**, 68-78.

4. Chen, J., Chen, T.-B., Gao, D., Lei, M., Zheng, G.-D., Liu, H.-T., et al. 2011. Reducing H_2S production by O_2 feedback control during large-scale sewage sludge composting. Waste Manage. **31**(1), 65-70.

5. Chen, L., Li, W., Zhao, Y., Zhang, S., Meng, L. 2022a. Evaluation of bacterial agent/nitrate coupling on enhancing sulfur conversion and bacterial community succession during aerobic composting. Bioresource Technol. **362**, 127848.

6. Chen, L., Li, W., Zhao, Y., Zhou, Y., Zhang, S., Meng, L. 2022b. Isolation and application of a mixotrophic sulfide-oxidizing Cohnella thermotolerans LYH-2 strain to sewage sludge composting for hydrogen sulfide odor control. Bioresource Technol. **345**, 126557.

7. Chen, W., Zhang, D., Luo, X., Wang, J., Xu, Q., Lu, X., et al. 2023. In-situ sulfite treatment enhanced the production of short-chain fatty acids from waste activated sludge in the side-stream anaerobic fermentation. Bioresource Technol. **370**, 128521.

8. Greff, B., Szigeti, J., Nagy, Á., Lakatos, E., Varga, L. 2022. Influence of microbial inoculants on co-composting of lignocellulosic crop residues with farm animal manure: A review. J Environ Manage. **302**, 114088.

9. Gu, W., Sun, W., Lu, Y., Li, X., Xu, P., Xie, K., et al. 2018. Effect of Thiobacillus thioparus 1904 and sulphur addition on odour emission during aerobic composting. Bioresource Technol. **249**, 254-260.

10. Guo, R., Li, G., Jiang, T., Schuchardt, F., Chen, T., Zhao, Y., et al. 2012. Effect of aeration rate, C/N ratio and moisture content on the stability and maturity of compost. Bioresource Technol. **112**, 171-178.

11. Han, Z., Qi, F., Wang, H., Li, R., Sun, D. 2019. Odor assessment of NH_3 and volatile sulfide compounds in a full-scale municipal sludge aerobic composting plant. Bioresource Technol. **282**, 447-455.

12. Hu, W., Zheng, G., Fang, D., Cui, C., Liang, J., Zhou, L. 2015. Bioleached sludge composting drastically reducing ammonia volatilization as well as decreasing bulking agent dosage and improving compost quality: A case study. Waste Mange. **44**, 55-62.

13. Jiang, J., Liu, X., Huang, Y., Huang, H. 2015. Inoculation with nitrogen turnover bacterial agent appropriately increasing nitrogen and promoting maturity in pig manure composting. Waste Mange. **39**, 78-85.

14. Jiang, T., Ma, X., Tang, Q., Yang, J., Li, G., Schuchardt, F. 2016. Combined use of nitrification inhibitor and struvite crystallization to reduce the NH_3 and N_2O emissions during composting. Bioresource Technol. **217**, 210-218.

15. Jiang, X., Yan, R., Tay, J.H. 2008. Reusing H2S-exhausted carbon as packing material for odor biofiltration. Chemosphere. **73**(5), 698-704.

16. Li, M.-X., He, X.-S., Tang, J., Li, X., Zhao, R., Tao, Y.-Q., et al. 2021. Influence of moisture content on chicken manure stabilization during microbial agent-enhanced composting. Chemosphere. **264**, 128549.

17. Liu, N., Hou, T., Yin, H., Han, L., Huang, G. 2019. Effects of amoxicillin on nitrogen transformation and bacterial community succession during aerobic composting. J Hazard Mater. **362**, 258-265.

18. Liu, W., Rahaman, M.H., Mąkinia, J., Zhai, J. 2021. Coupling transformation of carbon, nitrogen and sulfur in a long-term operated full-scale constructed wetland. Sci Total Environ. **777**, 146016.

19. Liu, Y., Ding, L., Wang, B., He, Q., Wan, D. 2020. Using the modified pine wood as a novel recyclable bulking agent for sewage sludge composting: Effect on nitrogen conversion and microbial community structures. Bioresource Technol. **309**, 123357.

20. Meng, L., Li, W., Zhang, S., Wu, C., Lv, L. 2017. Feasibility of co-composting of sewage sludge, spent mushroom substrate and wheat straw. Bioresource Technol. **226**, 39-45.

21. Meng, L., Zhang, S., Gong, H., Zhang, X., Wu, C., Li, W. 2018. Improving sewage sludge composting by addition of spent mushroom substrate and sucrose. Bioresource Technol. **253**, 197-203.

22. Namgung, H.K., Ahn, H., Song, J. 2012. Development of a two-phase bioreactor for the biological removal of hydrogen sulfide from biogas. Energy Procedia. **14**, 1143-1148.

23. Peng, X.-Y., Wang, S.-P., Chu, X.-L., Sun, Z.-Y., Xia, Z.-Y., Xie, C.-Y., et al. 2023. Valorizing kitchen waste to produce value-added fertilizer by thermophilic semi-continuous composting followed by static stacking: Performance and bacterial community succession analysis. Bioresource Technol. **373**, 128732.

24. Plas, C., Harant, H., Danner, H., Jelinek, E., Wimmer, K., Holubar, P., et al. 1992. Ratio of biological and chemical oxidation during the aerobic elimination of sulphide by colourless sulphur bacteria. Appl Microbiol Biot. **36**, 817-822.

25. Read-Daily, B., Tank, J., Nerenberg, R. 2011. Stimulating denitrification in a stream mesocosm with elemental sulfur as an electron donor. Ecol Eng. **37**(4), 580-588.

26. Rincón, C.A., De Guardia, A., Couvert, A., Le Roux, S., Soutrel, I., Daumoin, M., et al. 2019. Chemical and odor characterization of gas emissions released during composting of solid wastes and digestates. J Environ Manage. **233**, 39-53.

27. Sameri, M.J., Savari, F., Hoseinynejad, K., Danyaei, A., Mard, S.A. 2022. The hepato-protective effect of H2S-modified and non-modified mesenchymal stem cell exosomes on liver ischemia-reperfusion injury in mice: The role of MALAT1. Biochem Bioph Res Co, **635**. 194-202.

28. Szanto, G.L., Hamelers, H.V.M., Rulkens, W.H., Veeken, A.H.M. 2007. NH_3, N_2O and CH_4 emissions during passively aerated composting of straw-rich pig manure. Bioresource Technol. **98**(14), 2659-2670.

29. Tan, X., Yang, Y.-L., Li, X., Zhou, Z.-W., Liu, C.-J., Liu, Y.-W., et al. 2020. Intensified nitrogen removal by heterotrophic nitrification aerobic denitrification bacteria in two pilot-scale tidal flow constructed wetlands: Influence of influent C/N ratios and tidal strategies. Bioresource Technol. 302, 122803.

30. Li, C., Li, H., Yao, T., Su, M., Li, J., Liu, Z., et al. 2020. Effects of microbial inoculation on enzyme activity, available nitrogen content, and bacterial succession during pig manure composting. Bioresource Technol. 306, 123167.

31. Temel, F.A. 2023. Evaluation of the influence of rice husk amendment on compost quality in the composting of sewage sludge. Bioresource Technol. 128748.

32. Wan, L., Wang, X., Cong, C., Li, J., Xu, Y., Li, X., et al. 2020. Effect of inoculating microorganisms in chicken manure composting with maize straw. Bioresource Technol. **301**, 122730.

33. Wang, B., Wang, Y., Wei, Y., Chen, W., Ding, G., Zhan, Y., et al. 2022. Impact of inoculation and turning for full-scale composting on core bacterial community and their co-occurrence compared by network analysis. Bioresource Technol. **345**, 126417.

34. Wang, X., Zhao, Y., Wang, H., Zhao, X., Cui, H., Wei, Z. 2017. Reducing nitrogen loss and phytotoxicity during beer vinasse composting with biochar addition. Waste Mange. **61**, 150-156.

35. Wang, Y., Bi, L., Liao, Y., Lu, D., Zhang, H., Liao, X., et al. 2019. Influence and characteristics of Bacillus stearothermophilus in ammonia reduction during layer manure composting. Ecotox Environ Safe. **180**, 80-87.

36. Xu, Z., Li, R., Liu, T., Zhang, G., Wu, S., Xu, K., et al. 2022. Effect of inoculation with newly isolated thermotolerant ammonia-oxidizing bacteria on nitrogen conversion and microbial community during cattle manure composting. J Environ Manage. **317**, 115474.

37. Yang, W., Lu, H., Khanal, S.K., Zhao, Q., Meng, L., Chen, G.-H. 2016. Granulation of sulfur-oxidizing bacteria for autotrophic denitrification. Water Res. **104**, 507-519.

38. Yang, Y.-R., Guo, Y.-X., Wang, Q.-Y., Hu, B.-Y., Tian, S.-Y., Yang, Q.-Z., et al. 2022. Impacts of composting duration on physicochemical properties and microbial communities during short-term composting for the substrate for oyster mushrooms. Sci Total Environ. **847**, 157673.

39. Yu, H., Xie, B., Khan, R., Shen, G. 2019a. The changes in carbon, nitrogen components and humic substances during organic-inorganic aerobic co-composting. Bioresource Technol. **271**, 228-235.

40. Yu, J., Gu, J., Wang, X., Guo, H., Wang, J., Lei, L., et al. 2020. Effects of inoculation with lignocellulose-degrading microorganisms on nitrogen conversion and denitrifying bacterial community during aerobic composting. Bioresource Technol. **313**, 123664.

41. Yu, Y., Chen, L., fang, Y., Jia, X., Chen, J. 2019b. High temperatures can effectively degrade residual tetracyclines in chicken manure through composting. J Hazard Mater. **380**, 120862.

42. Yuan, J., Yang, Q., Zhang, Z., Li, G., Luo, W., Zhang, D. 2015. Use of additive and pretreatment to control odors in municipal kitchen waste during aerobic composting. J Environ Sci. **37**, 83-90.

43. Zhang, H., Li, G., Gu, J., Wang, G., Li, Y., Zhang, D. 2016. Influence of aeration on volatile sulfur compounds (VSCs) and NH_3 emissions during aerobic composting of kitchen waste. Waste Mange. **58**, 369-375.

44. Zhang, H., Schuchardt, F., Li, G., Yang, J., Yang, Q. 2013. Emission of volatile sulfur compounds during composting of municipal solid waste (MSW). Waste Mange. **33**(4), 957-963.

45. Zhao, Y., Li, W., Chen, L., Meng, L., Zheng, Z. 2020. Effect of enriched thermotolerant nitrifying bacteria inoculation on reducing nitrogen loss during sewage sludge composting. Bioresource Technol. **311**, 123461.

46. Zhao, Y., Li, W., Chen, L., Zhou, Y., Meng, L., Zhang, S. 2022. Isolation and application of a thermotolerant nitrifying bacterium Gordonia paraffinivorans N52 in sewage sludge composting for reducing nitrogen loss. Bioresource Technol. **363**, 127959.

47. Zhu, P., Shen, Y., Pan, X., Dong, B., Zhou, J., Zhang, W., et al. 2021. Reducing odor emissions from feces aerobic composting: additives. RSC advances. **11**(26), 15977-15988.

УДК 622.692.4 DOI: 10.37816/eeste-2024-1-214-216

ТЕРМОМЕТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА УЛАВЛИВАНИЯ ПАРОВ БЕНЗИНА
THERMOMETRIC SYSTEM FOR CAPTURING GASOLINE VAPORS

Владислав Дмитриевич Винокуров, Станислав Дмитриевич Винокуров, Жанна Юрьевна Кочетова
Vladislav D. Vinokurov, Stanislav D. Vinokurov, Zhanna Yu. Kochetova

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Россия, Воронеж
Military Educational and Scientific Center Air Force «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy», Russia, Voronezh
(e-mail: zk_vva@mail.ru)

Аннотация: Представлена принципиальная электрическая схема термометрической системы улавливания паров бензина. Рассчитана масса паров бензина, теряемая из бака при нагревании топлива в системе.

Abstract: A schematic diagram of a thermometric system for capturing gasoline vapor is presented. The mass of gasoline vapors lost from the tank when heating the fuel in the system is calculated.

Ключевые слова: экология, система термометрирования, выбросы углеводородов, двигатель, автомобили.

Keywords: ecology, thermometry system, hydrocarbon emissions, engine, cars.

При эксплуатации автомобилей бензин испаряется в топливных баках и карбюраторе. Образующиеся пары углеводородов загрязняют атмосферу крупных городов, напряженных автомагистралей. Углеводороды характеризуются токсичностью, а некоторые олефиновые углеводороды способны к химическим реакциям с другими загрязнениями, содержащимися в атмосфере [1]. Пары топлива могут переносится атмосферным воздухом на большие расстояния, оседать на почву, воды. Продукты трансформации нефтеуглеводородов могут находится в почвах при определенных климатических условиях десятки лет [2].

В настоящее время активно проводятся работы по созданию систем, уменьшающих выброс в атмосферу углеводородов из топливного бака и поплавковой камеры карбюратора. Система улавливания паров бензина (СУПБ) предназначена для сбора, хранения и нейтрализации паров топлива. Она должна удовлетворять следующим требованиям: предотвращать попадание паров бензина в атмосферу при эксплуатации автомобилей; работать автоматически; не ухудшать мощностные, экономические и токсические характеристики автомобиля.

Для выбора оптимальных размеров элементов системы улавливания и мест их установки проводили исследования температурных режимов тех частей автомобиля, тепловое состояние которых влияет на количество испаряющихся углеводородов. Для этих целей разработана система термометрирования на основе полупроводниковых приборов. Эта система позволяет измерять медленно меняющиеся температуры (до 300 °С) газообразных, жидких и твердых сред. В качестве датчиков температуры использовали кремниевые стабилитроны типа Д-814, Д-808, Д-809, которые наряду с линейными термометрическими характеристиками обладают высокой чувствительностью, стабильностью, антикоррозийной стойкостью и вибропрочностью, что особенно важно при использовании на автомобилях. Принципиальная электрическая схема термометрической системы приведена на рисунке 1.

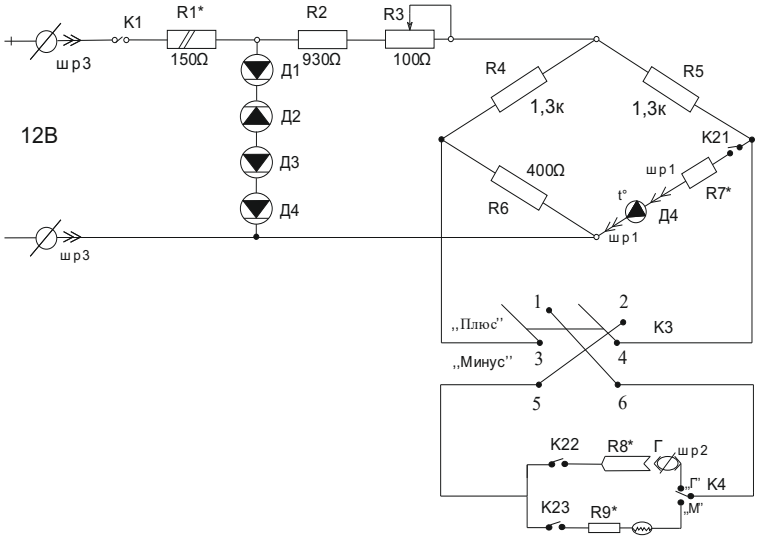


Рисунок 1 — Принципиальная электрическая схема термометрической системы.

Для выбора оптимального количества адсорбента проведен аналитический расчет выброса углеводородов из топливных баков отечественных легковых автомобилей. Исходные данные для расчета выбирали исходя из нормативных документов по испытаниям на выделения паров топлива [3]. Эти испытания предусматривают следующие этапы:

1) определение суточных испарений – количества углеводородов, выделяющихся из топливной системы и выхлопной трубы в течение (60±10) мин при нагревании топливных баков, заполненных топливом на 40 %, от 15 до 30˚С;

2) определение дорожных испарений – количества выделяющихся углеводородов из системы питания при имитации движения автомобиля по ездовому циклу продолжительностью 1372 с на стенде с беговыми барабанами;

3) определение стояночных испарений – выброса углеводородов из системы питания и выхлопной трубы при выдержке автомобиля с опушенным капотом после ездового цикла в течение (60±10) мин.

Как показали предварительные испытания, основная доля выброса углеводородов приходится на I этап испытаний, причем на этом этапе 97–99% общего количества углеводородов выделяется из топливного бака. Следовательно, этот этап испытаний является определяющим при выборе емкости адсорбера, поэтому расчет выброса проводился для этого этапа. В основу расчета положена упрощенная теория потерь от испарения нефтепродуктов [4].

Для расчетов введем следующие обозначения: c – объемная концентрация пара в газовом пространстве; $c_{ср}$ – средняя объемная концентрация пара в газовом пространстве; $G_б$ – масса бензина, испарившегося из бака; $G_г$ – масса воздуха в газовом пространстве; $M_б$ – мольная масса паров бензина; $M_В$ – мольная масса воздуха; $P_г$ – абсолютное давление в газовом пространстве; $P_{н.п}$ – давление насыщенных паров бензина; R – газовая постоянная воздуха; $R_б$ – газовая постоянная паров бензина; $\bar{R}$ – универсальная газовая постоянная; T – температура бензина; V – объем газового пространства бака; $V_б$– объем бензина, испарившегося из бака; $V_в$ – объем воздуха; $\rho_б$ – плотность паров бензина в паровоздушной смеси; $\rho_в$– плотность воздуха в паровоздушной смеси. Индексы «1» и «2» соответствуют начальному и конечному состоянию.

Массу воздуха $G_{в1}$, содержащегося в газовом пространстве до начала процесса выталкивания, находили по закону Дальтона:

$$VP_{r1}(1-c_1) = G_{в1}RT_1 = C_{в1}\frac{\bar{R}}{M_в}T_1. \quad (1)$$

Масса воздуха в конце процесса выталкивания определяется аналогично (2).

$$G_{в2} = \frac{VP_{r2}}{T_2}(1 - c_2)\frac{M_в}{\bar{R}}. \quad (2)$$

Масса воздуха, ушедшая из бака через выпускной клапан вместе с паровоздушной смесью за время процесса нагревания, составляет:

$$G_в = G_{в1} - G_{в2}Gd = V\left[(1 - c_1)\frac{P_{r1}}{T_1} - (1 - c_2)\frac{P_{r2}}{T_2}\right]\frac{M_в}{\bar{R}}. \quad (3)$$

Вместе с воздухом с паровоздушной смесью из бака уходит некоторое количество паров топлива. Масса топлива, уходящая с паровоздушной смесью, определяется из отношения:

$$\frac{G_в}{G_б} = \frac{V_в}{V_б} * \frac{p_в}{p_б}. \quad (4)$$

Объемы газов по закону Дальтона пропорциональны их объёмным концентрациям:

$$\frac{V_в}{V_б} = \frac{1 - \mathrm{c_{ср}}}{\mathrm{c_{ср}}}. \quad (5)$$

Плотности $p_в$ и $p_б$ пропорциональны мольным массам воздуха и паров бензина:

$$\frac{p_в}{p_б} = \frac{M_в}{M_б}. \quad (6)$$

Подставив (6) и (7) в (5), получим:

$$\frac{G_в}{G_б} = \frac{1 - \mathrm{c_{ср}}}{\mathrm{c_{ср}}}\ \frac{M_в}{M_б}. \quad (7)$$

Подставив в (7) значение $G_в$ из (3), найдем массу паров бензина, теряемых из бака во время процесса нагревания топлива:

$$G_в = V\left[(1 - c_1)\frac{P_{r1}}{T_1} - (1 - c_2)\frac{P_{r2}}{T_2}\right]\frac{1 - \mathrm{c_{ср}}}{\mathrm{c_{ср}}}\frac{M_б}{\bar{R}}. \quad (8)$$

При негерметичности баков потери от испарения можно определить по приближенной формуле:

$$G_б = 0{,}7\ V\ \frac{P_{н.п.1} + P_{н.п.2}}{T_1 + T_2}\frac{1}{R_б}. \quad (9)$$

Выводы

Расчет с использованием данной методики показывает, что наличие выпускных клапанов, повышающих давление в баках, значительно уменьшает выброс углеводородов в атмосферу.

Некоторое повышение температуры топлива и его паров на этапе «ездовой цикл» можно объяснить нагреванием топлива от системы выпуска отработавших газов. Температура топлива в поплавковой камере достигает своего максимального значения при ездовом цикле и составляет 60—65°С. После остановки двигателя примерно через 10 мин наблюдается вторичное повышение температуры топлива за счет нагревания корпуса поплавковой камеры от горячих частей двигателя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кочетова Ж.Ю. Экомониторинг нефти и нефтепродуктов в объектах окружающей среды: монография. Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2016. 204 с.

2. Кочетова Ж.Ю., Маслова Н.В. Базарский О.В. Авиационно-ракетные кластеры и окружающая среда: монография. М.: Инфра-М, 2022. 266 с.

3. Голубев И.Р. Новиков Ю.В. Окружающая среда и транспорт. М.: Транспорт, 1987. 207 с.

4. Мищенко А.Я., Медин Г.А., Захломин А.Е. Комплексный подход к осуществлению контроля технического состояния и выбросов вредных веществ с отработавшими газами двигателей. М.: РАН, 1992. 134 с.

УДК 628.349.094.3 DOI: 10.37816/eeste-2024-1-217-220

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД, СОДЕРЖАЩИХ КРАСИТЕЛИ, С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФЕРРАТОВ
RESEARCH OF DYE-CONTAINING WASTEWATER TREATMENT PROCESSES USING FERRATES

Николай Вячеславович Клипов, Григорий Игоревич Гусев, Татьяна Валерьевна Извекова, Елена Юрьевна Квиткова, Андрей Андреевич Гущин
Nikolay V. Klipov, Grigory I. Gusev, Tatiana V. Izvekova, Elena Yu. Kvitkova, Andrey A. Gushchin

Ивановский государственный химико-технологический университет, Россия, Иваново
Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Russia, Ivanovo
(e-mail: klipov-85@mail.r, grisha.gusev.05@mail.ru, mbimpa@bk.ru, bur_1981@mail.ru, gushchin@isuct.ru)

Аннотация: Изучены кинетические особенности процессов, протекающих при деструкции водных растворов красителей под действием ферратов. Оценены кинетические параметры процесса, выявлено влияние различных факторов на эффективность очистки воды от исследуемых органических соединений.

Abstract: The kinetic features of the processes occurring during the destruction of aqueous solutions of dyes under the influence of ferrates have been studied. The kinetic parameters of the process were assessed, the influence of various factors on the efficiency of purification of water from the studied organic compounds was revealed.

Ключевые слова: очистка воды, красители, ферраты, кинетика деструкции.
Keywords: water purification, dyes, ferrates, destruction kinetics.

Любое промышленное производство характеризуется воздействием на окружающую среду. И одной из важнейших экологических проблем, требующих решения является загрязнение гидросферы промышленными стоками [1]. К одним из приоритетных загрязнителей окружающей среды относятся синтетические красители (СК) [2]. Производство синтетических красителей - отрасль промышленности тонкого органического синтеза. СК получают в результате проведения многостадийного химического синтеза из промежуточных продуктов, производимых, в свою очередь, из ароматических и гетероароматических соединений, вырабатываемых угле- и нефтехимической промышленностью, и практически на каждом этапе производственного цикла образуются сточные воды. Предприятия, которые используют красители в своем производстве, так же интенсивно загрязняют окружающую среду. В результате таких технологических операций как крашение и промывка образуется значительное количество окрашенных сточных вод. Процесс окрашивания ведется рабочими растворами, и до 50 % пигментов может попадать в промышленные стоки [2]. Поступление в природные водоемы неочищенных или недостаточно очищенных производственных сточных вод ухудшает экологическое состояние водных объектов. Поэтому подобные сточные воды необходимо подвергать очистке, а с учетом того фактора, что СК являются чрезвычайно стойкими, то зачастую традиционные методы очистки не позволяют достигать необходимой эффективности.

Использование ферратов может быть одним из возможных эффективных методов очистки сточных вод от трудноокисляемых органических соединений [3]. Окисление Fe(VI) признано «зеленой» технологией, позволяющей с высокой эффективностью окислять не только исходные высокотоксичные, персистентные загрязняющие вещества, но образующиеся в результате их разложения, промежуточные соединения [4].

Объектом исследования в работе являются водные растворы, содержащие синтетический краситель. В качестве красителя использовался кислотный красный (Acid Red) [5]. Кислотные красители представляют собой порошкообразное вещество, которое легко растворяется в воде. Кислотный красный относится к классу органических одноазотных красителей. Его структурная формула представлена на рисунке 1. Молекулярная формула красителя: $C_{16}H_{12}ClN_4NaO_5S$; молекулярная масса: 430.80.

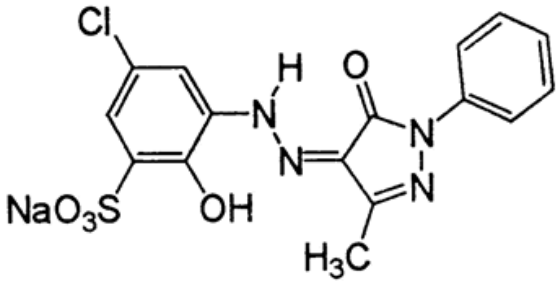


Рисунок 1 — Структурная формула Acid Red.

Данный краситель имеет широкую область применения и используется для окрашивания текстиля, пряжи, кожи, бетона, щепы, в автохимии (для окрашивания антифризов, автошампуней, стеклоомывающих жидкостей) и бытовой химии.

Получение феррата, используемого в процессе очистки модельных растворов, осуществляли химическим способом – растворением $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ в щелочном растворе NaClO с последующим нагреванием полученной смеси [6,7].

Зависимость изменения концентрации (C) и эффективности деструкции (α) красителя от времени обработки водных растворов ферратом натрия приведена на рисунке 2.

Результаты (рис. 2) показывают, что эффективность деструкции существенно зависит от соотношения концентраций красителя и феррата в водном растворе, а также времени обработки – при увеличении начальной концентрации красителя в 20 раз эффективность разложения снижается в 8,3 раза при максимальных временах обработки. Т.е. можно предположить, что концентрации феррата в растворе не хватает для полного разложения красителя.

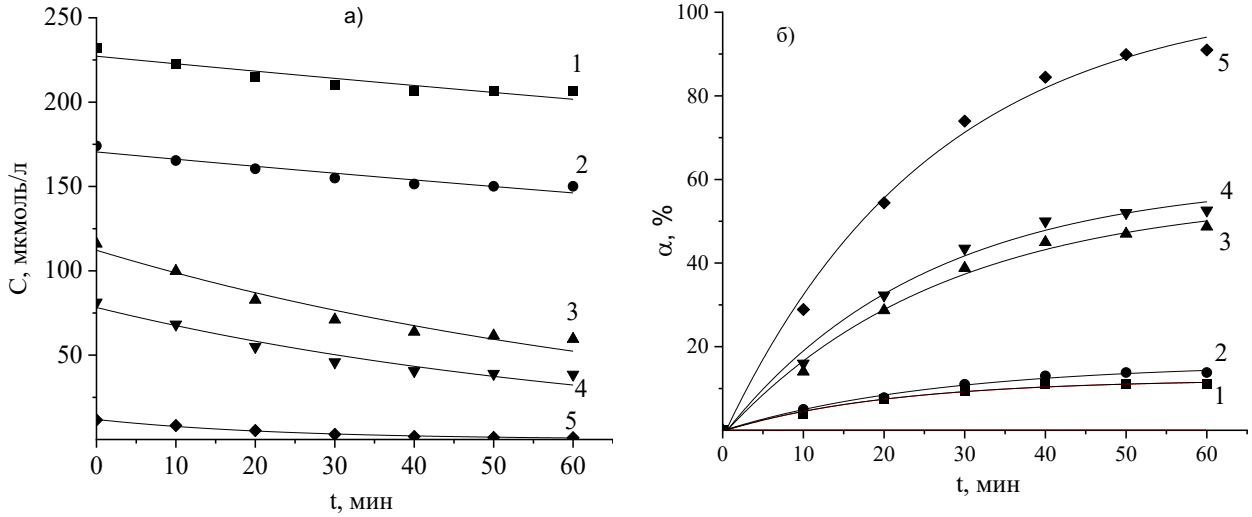


Рисунок 2 — Кинетика (а) и степень деструкции (б) красителя при обработке ферратом. Условия эксперимента: концентрация феррата в растворе – 1 г/л; соотношении объема раствора феррата к водному раствору красителях 1:10; начальная концентрация красителя в растворе: 1 – 100 мг/л, 2 – 75 мг/л; 3 – 50 мг/л, 4 – 35 мг/л, 5 – 5 мг/л.

Согласно химической формуле исследуемого загрязнителя (рис. 1) для его полного окисления соотношение феррат:краситель должно составлять примерно 13 к 1:

$4C_{16}H_{12}ClN_4O_5S^- + 49FeO_4^{2-} + 49\bar{e} = 64CO_2 + 24H_2O + 49Fe^{3+} + 4Cl^- + 16NO_3^- + 4SO_4^{2-}$.

Эксперимент, результаты которого приведены на рис. 1, проводился при соотношении феррат:краситель – 1:10, что и объясняет снижение эффективности в 8 раз при росте концентрации загрязнителя в водном растворе.

В соответствии с [8], для окисления органических соединений предпочтителен механизм с 2-х электронным переносом, который реализуется, когда в растворе отсутствуют Fe(V).

При переходе от VI-валентных форм ферратов к V-валентным наблюдается сдвиг величины pH раствора на 3 - 4 единицы pH в щелочную область, т.е. феррат VI является более основными, чем феррат V, и, следовательно, их диссоциация протекает легче, чем для форм ферратов V, что увеличивает окислительную способность ферратов в степени окисления VI.

Результаты экспериментов по влиянию начальной концентрации феррата на эффективность разложения красителя приведены на рис. 3.

Увеличение концентрации феррата в 2,5 раза приводит к росту эффективности деструкции красителя на 20 %, особенно этот эффект проявляется при временах обработки до 200 мин, дальнейшее время обработки приводит к постепенному снижению скорости окисления и при 400 мин степень разложения красителя составляет около 80 %.

Было установлено, что существенное влияние на процесс разложение красителя оказывало время, в течение которого проводилась обработка модельных растворов и для полной деструкции загрязнителя ($\alpha \approx 99$ %) необходимо около 1400 мин обработки (24 часа).

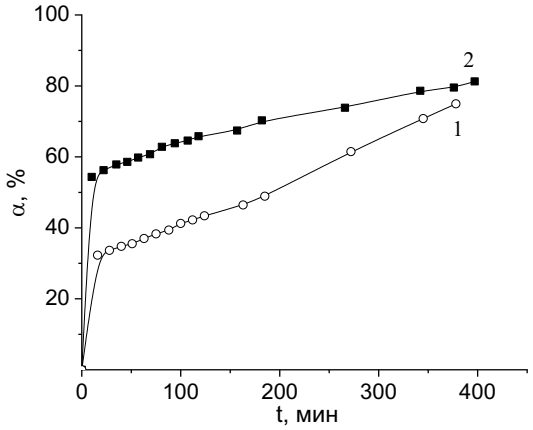


Рисунок 3 — Влияние начальной концентрации феррата на эффективность деструкции красителя
Условия эксперимента: концентрация феррата в растворе – 1 г/л; начальная концентрация красителя в растворе – 35 мг/л; соотношение объема раствора феррата к водному раствору красителя:
1 – 1:2,5; 2 – 1:1.

Вид кинетических закономерностей на рис. 2 свидетельствует, что деструкция органических соединений во всех случаях описывается реакцией псевдопервого порядка. Значения величин скоростей и эффективных констант протекающих процессов, приведены в табл. 1.

Таблица – 1 Эффективные константы скорости разложения органических соединений

№	C, мг/л	k, мин$^{-1}$			v, мг/(л·с)		
		фенол	2,4-ДХФ	краситель	фенол	2,4-ДХФ	краситель
1	5	0,57±0,01	0,96±0,24	0,0430±0,0021	0.0475	0.0800	0.0036
2	50	0,13±0,04	0,69±0,09	0,0127±0,0013	0.1083	0.5750	0.0106
3	100	0,10±0,01	0,67±0,12	0,0020±0,0004	0.1667	1.1167	0.0033

Скорости разложения красителя в 330 и 50 раз ниже, чем для 2,4-дихлорфенола (2,4-ДХФ) и фенола, что подтверждает вышесказанные предположения, что краситель является очень устойчивым соединением к процессам химического окисления.

Экологическую эффективность деструкции исследуемых органических соединений можно оценить по степени минерализация, которую можно определить по выходу CO_2 как конечного продукта окислительной деструкции органических соединений.

В процессе обработки модельных растворов ферратом в жидкой фазе происходит образование гидрокарбонат-ионов, которые являются конечными продуктами процесса

окисления красителя. Эксперименты показали, что степень минерализации составляет 6 % и 36 % соответственно для 2,4-ДХФ и фенола соответственно, а для красителя максимальное содержание диоксида углерода в системе после обработки составило около 50 %, т.е. несмотря на низкие скорости деструкции красителя (по сравнению с фенолами) полнота его деструкции существенно выше.

Выводы

Установлено, что обработка ферратами является эффективным инструментом деструкции высокостойких органических загрязнителей. Его использование позволяет окислять поллютанты с 99 % степенью разложения. Выявлены основные параметры, влияющие на эффективность процесса деструкции - соотношение концентраций загрязнителя и феррата в водном растворе и время обработки. Определена полнота деструкции исходного органического соединения.

Работа выполнялась в рамках государственного задания на выполнение НИР: тема № FZZW-2023-0010.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Y. Shen, Y. Wang, Y. Chen, J. K.Park, S. Fang, K. Feng Synthesis of Fe_3O_4/CuO/ZnO/RGO and its catalytic degradation of dye wastewater using dielectric barrier discharge plasma // Arabian Journal of Chemistry. 2023. V. 16. №. 4. P. 104571.

2. S. H. Kim, J. Seo, Y. Hong, Y. Shin, H. J. Chung, H. R. An, H. U. Lee Construction of an underwater plasma and Fenton hybrid system for the rapid oxidation of organic dyes and antibiotics // Journal of Water Process Engineering. 2023. V. 52. P. 103519.

3. Sharma V. K., Zboril R., Varma R. S. Ferrates: greener oxidants with multimodal action in water treatment technologies //Accounts of chemical research. 2015. Т. 48. №. 2. С. 182-191.

4. Dar A. A. et al. Sustainable ferrate oxidation: Reaction chemistry, mechanisms and removal of pollutants in wastewater //Environmental Pollution. 2021. Т. 290. С. 117957.

5. Dye|World dye variety. [Электронный ресурс]. – http://www.worlddyevariety.com/acid-dyes/acid-red-362.html (дата обращения: 02.10.2023).

6. Jiang J. Q., Lloyd B., Grigore L. Preparation and evaluation of potassium ferrate as an oxidant and coagulant for potable water treatment //Environmental Engineering Science. 2001. Т. 18. №. 5. С. 323-328.

7. El Maghraoui A. et al. Synthesis and characterization of ferrate (VI) alkali metal by wet method //Int. J. Mod. Eng. Res. 2012. Т. 2. С. 4521-4523.

8. Sharma V. K., Zboril R., Varma R. S. Ferrates: greener oxidants with multimodal action in water treatment technologies //Accounts of chemical research. 2015. Т. 48. №. 2. С. 182-191.

УДК 628.316 DOI: 10.37816/eeste-2024-1-221-223

ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД ОТ АНТИБИОТИКОВ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ
WASTEWATER TREATMENT FROM ANTIBIOTICS USING PLASMOCHEMICAL METHOD

Юлия Вадимовна Котова, Ксения Николаевна Киселева, Анна Алексеевна Извекова, Андрей Андреевич Гущин, Елена Юрьевна Квиткова
Yulia V. Kotova, Ksenia N. Kiseleva, Anna A. Izvekova, Andrey A. Gushchin, Elena Yu. Kvitkova

Ивановский государственный химико-технологический университет, Россия, Иваново
Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Russia, Ivanovo
(e-mail: julu_cat4@mail.ru, ksenya.kiseleva.0202@mail.ru, esket@yandex.ru, gushchin@isuct.ru, bur_1981@mail.ru)

Аннотация: Представлены результаты исследований очистки сточных вод от антибиотиков (на примере левомицетина) плазмохимическим методом. Показано, что степень деструкции левомицетина под действием диэлектрического барьерного разряда достигает 99,5 %. Определены продукты деструкции левомицетина – карбоновые кислоты и диоксид углерода.

Abstract: The results of studies of wastewater treatment from antibiotics (using the example of chloramphenicol) using the plasma-chemical method are presented. It has been shown that the degree of destruction of chloramphenicol under the influence of a dielectric barrier discharge reaches 99.5%. The destruction products of chloramphenicol were determined - carboxylic acids and carbon dioxide.

Ключевые слова: очистка воды, левомицетин, диэлектрический барьерный разряд.
Keywords: water purification, chloramphenicol, dielectric barrier discharge.

Во всем мире использование антибиотиков превышает 100 000 тонн в год, и многие ученые обеспокоены по поводу дальнейшей судьбы этих веществ. Установлено, что антибиотики распространены в окружающей среде практически повсеместно, и всё чаще их обнаруживают в пресных водах, причём в значительных концентрациях. Кроме того, важными аспектами загрязнения пресных вод антибиотиками является то, что к ним восприимчивы многие микроорганизмы и у бактерий, живущих в окружающей среде, у которых может вырабатываться резистентность к антибактериальным препаратам; также загрязнение антибиотиками влияет на пищевые цепи, в результате чего могут нарушиться все виды экологических процессов [1].

Сточные воды, содержащие остатки антибиотиков, образуются в жилых районах и больницах, на промышленных предприятиях, животноводческих фермах. Поскольку антибиотики не подвергаются метаболическим превращениям на существующих очистных сооружениях и транзитом проходят через них [2], стоки, поступающие в водоприёмники, могут содержать целый спектр лекарственных препаратов [3]. Все это в совокупности ставит перед учеными-экологами задачу по предотвращению загрязнения окружающей среды фармацевтическими соединениями.

Проблема очистки питьевых, сточных, промышленных и поверхностных вод от фармакологических препаратов может быть решена путем использования современных высокоэффективных методов. Одним из таких методов является применение диэлектрического барьерного разряда (ДБР), который в последнее время все чаще используется в технике защиты окружающей среды. Плазма такого разряда является сильнонеравновесной и служит источником активных частиц (гидроксильных и

гидропероксидных радикалов, атомарного кислорода, озона и др.), обладающих большим окислительным потенциалом и позволяющих разложить молекулы практически любого органического соединения, в том числе и антибиотиков. В работе [4] показано, что обработка в реакторе ДБР растворов, содержащих тетрациклина гидрохлорид, окисляет указанное соединение с эффективностью 75-89 %,

Целью настоящей работы являлось изучение окислительной деструкции левомицетина в водных растворах плазмохимическим методом. Эксперимент проводился на установке, основным элементом которой служил реактор ДБР с коаксиальным расположением электродов, описание конструктивных особенностей и принципа действия которого приведено в работах [5,6]. Барьерный разряд возбуждался от высоковольтного трансформатора, значение переменного (ток с частотой 50 Гц) напряжения между электродами составляло 13 кВ. В качестве плазмообразующего газа использовался технический кислород (расход 3 $см^3/с$).

Объектом исследования являлись водные растворы левомицетина с начальными концентрациями ($C_н$), равными 9,0; 22,5 и 45,0 мг/л. Левомицетин (хлорамфеникол, брутто-формула $C_{11}H_{12}Cl_2N_2O_5$) относится к группе антибактериальных препаратов широкого спектра действия, достаточно распространенный в России лекарственный препарат.

Время контакта раствора с зоной разряда (τ) варьировалось расходом жидкости, подаваемой на очистку, и в условиях эксперимента составляло 1,5-6,5 с.

Экспериментально установлено, что эффективность разложения левомицетина растёт с увеличением времени контакта раствора и при максимальном рабочем значении τ степень разложения левомицетина достигает 99,5 % (для $C_н$ = 9,0 мг/л), 93,3 % (для $C_н$ = 22,5 мг/л) и 79,4 % (для $C_н$ = 45,0 мг/л).

На рисунке 1 представлены результаты окислительной деструкции левомицетина в реакторе ДБР при различных $C_н$. Видно, что при увеличении начальной концентрации загрязняющего вещества в модельном растворе интенсивность процесса разложения снижается. В рассматриваемой окислительной системе кинетика разложения левомицетина описывается уравнением псевдопервого порядка (коэффициент корреляции R > 0,96), а эффективные константы скорости разложения для трех исследуемых начальных концентраций левомицетина составляли 0,64; 0,54 и 0,31 $с^{-1}$ соответственно.

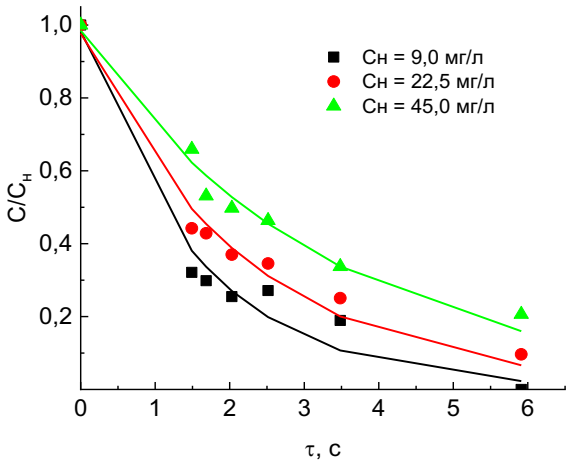


Рисунок 1 — Разложение левомицетина в ДБР при различных начальных концентрациях.

Одним из продуктов окислительной деструкции органических соединений являются карбоновые кислоты. На рисунке 2 показана кинетика образования карбоновых кислот (в пересчете на уксусную кислоту) при обработке растворов левомицетина в ДБР.

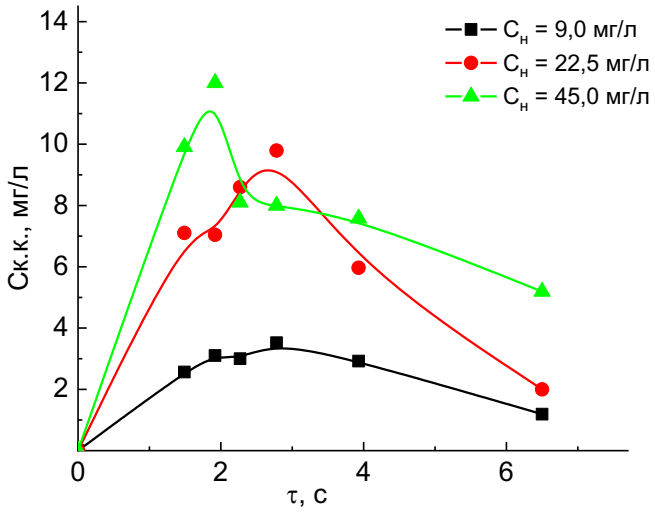


Рисунок 2 — Кинетика образования карбоновых кислот при обработке левомицетина в ДБР.

В максимуме их выход составляет 26-43 % от начального содержания углерода в системе. Но карбоновые кислоты не являются конечным продуктом разложения левомицетина, а окисляются далее до углекислого газа и воды. Измерение концентрации CO_2 в газовой фазе на выходе из разрядного устройства показало, что с увеличением начальной концентрации левомицетина в растворе его выход уменьшается с 81 до 23 %. Отметим, что сходимость баланса «по углероду» по указанным продуктам деструкции левомицетина также снижается при увеличении $C_н$ (для минимальной в условиях эксперимента концентрации она близка к 100 %, а при максимальной рабочей концентрации – снижается до 49 %).

Таким образом, обработка сточных вод, содержащих антибиотики (в частности, левомицетин), в плазме ДБР существенно снижает их концентрацию и может использоваться как один из этапов комплексной очистки сточных вод фармацевтических производств.

Исследование проведено с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием ИГХТУ (при поддержке Минобрнауки России, соглашение № 075-15-2021-671). Работа выполнялась в рамках государственного задания на выполнение НИР: тема № FZZW-2023-0010.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Danner M. C., Robertson A., Behrends V., Reiss J. Antibiotic pollution in surface fresh waters: Occurrence and effects // Science of the total environment. 2019. V. 664. P. 793-804.

2. Spielmeyer A., Petri M.S., Höper H., Hamscher G. Long-term monitoring of sulfonamides and tetracyclines in manure amended soils and leachate samples-A follow-up study // Heliyon. 2020. V. 6. № 8.

3. Тимофеева С.С., Гудилова О.С. Антибиотики в окружающей среде: состояние и проблемы // XXI век. Техносферная безопасность. 2021. Т. 6. №. 3 (23). С. 251-265.

4. Gushchin A., Grinevich V., Kvitkova E., Chugunov R., Izvekova T., Rruchinina N., Emzhina V., Ivantsova N., Rybkin V. Reducing the toxicity of tetracycline solutions and the kinetics of decomposition under the action of DBD in oxygen // Plasma Medicine. 2019. V. 9, N. 2. P. 101-110.

5. Gushchin, A. A., Grinevich, V. I., Shulyk, V. Y., Kvitkova, E. Y., & Rybkin, V. V. (2018). Destruction kinetics of 2, 4 dichlorophenol aqueous solutions in an atmospheric pressure dielectric barrier discharge in oxygen // Plasma chemistry and plasma processing. 2018. V. 38. P. 123-134.

6. Grinevich V.I., Kvitkova E.Y., Plastinina N.A., Rybkin V.V. Application of dielectric barrier discharge for waste water purification // Plasma Chem Plasma Process. 2011. V. 31. № 4. P. 573–583.

УДК 543.613.3: 543.08 DOI: 10.37816/eeste-2024-1-224-229

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЛЕГКИХ НЕФТЕПРОДУКТОВ В ПОЧВАХ С ПРИМЕНЕНИЕМ «ЭЛЕКТРОННОГО НОСА» НА ПЬЕЗОСЕНСОРАХ
IDENTIFICATION OF LIGHT PETROLEUM PRODUCTS IN SOILS USING AN «ELECTRONIC NOSE» ON PIEZOSENSORS

Жанна Юрьевна Кочетова*, Ирина Ивановна Косинова **,
Андрей Валерьевич Милованов, Алексей Андреевич Воскресенский***
Zhanna Yu. Kochetova*, Irina I. Kosinova **,
Andrey V. Milovanov, Alexey A. Voskresensky***

**Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Россия, Воронеж*
**Military Educational and Scientific Center Air Force «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy», Russia, Voronezh*
(e-mail: zk vva@mail.ru)
***Воронежский государственный университет, Россия, Воронеж*
*** Voronezh State University, Russia, Voronezh*
(e-mail: kosinova777@yandex.ru)

Аннотация: Рассмотрены варианты обработки и отображения аналитического сигнала «электронного носа» на основе пьезосенсоров при идентификации нефтепродуктов в почвах реального объекта. В статье аналитический сигнал матрицы из трех пьезосенсоров представлен в виде визуального «отпечатка запаха» и кластеров проб, отличающихся по химическому составу газовой фазы.

Abstract: The variants of processing and displaying the analytical signal of the «electronic nose» based on piezosensors for the identification of petroleum products in the soils of a real object are considered. In the article, the analytical signal of a matrix of three piezosensors is presented in the form of a visual «smell imprint» and clusters of samples differing in the chemical composition of the gas phase.

Ключевые слова: нефтепродукты, загрязнение почв, электронный нос, пьезосенсор, идентификация веществ, нейронная сеть.

Keywords: petroleum products, soil pollution, electronic nose, piezosensor, identification of substances, neural network.

«Электронные носы» на пьезосорбционных сенсорах являются универсальными детекторами запахов, то есть с применением одного «носа» можно идентифицировать запахи различного генезиса. Это возможно благодаря тому, что сорбционные покрытия пьезосенсоров в матрице подбираются не по их химическому сродству к индивидуальным компонентам детектируемой смеси газов (паров), а по различиям параметров взаимодействия в системе «сорбент-сорбат» [1]. Каждый сенсор при экспонировании его в анализируемой смеси паров дает свой неповторимый отклик (аналитический сигнал, кинетика сорбции), а суммарный отклик матрицы сенсоров, модифицированных различными сорбционными покрытиями, позволяет «увидеть» запах и идентифицировать его [2, 3].

Принцип действия пьезосенсоров основан на преобразовании изменений массы (молекул летучих веществ), присоединенной к поверхности кварцевого пьезосенсора, в приращения выходной частоты автогенератора [4]. По сути, пьезосенсоры являются миниатюрными весами, взвешивающими молекулы газообразных веществ. Главные их достоинства – высокая масс-чувствительность (10^{-12} г), энерго- и ресурсоэкономичность.

Число сенсоров в матрице зависит от сложности детектируемой смеси паров и может составлять от 3 до 200 [1, 5]. Результирующая картина одновременного отклика всех сенсоров является достаточно сложной, идентификация запаха и перевод его описания в удобный для

человеческого восприятия визуальный образ возможен с применением современных вычислительных устройств.

Методы формирования суммарного аналитического сигнала современных «электронных носов» разделяются на параметрические и непараметрические. Параметрические требуют большого числа экспериментальных данных, они основаны на получении и расчете функции плотности вероятности параметров, используемых для описания запаха (например, методы корреляционного анализа и линейной регрессии). Непараметрические методы не предполагают, что данные имеют статистический разброс (кластерный анализ, метод главных компонент). В этом случае отклики сенсоров сравнивают между собой на основе степени подобия (идентичности). Предварительно систему «электронный нос» калибруют по эталонным смесям паров (образцов запахов), с которыми впоследствии и сравниваются запахи анализируемых проб.

В последнее время для идентификации запахов успешно применяют метод нейронных сетей, основанный на параллельном анализе данных Хорна [6]. Этот статистический метод предполагает определение количества параметров, которые необходимо учитывать при исследовательском факторном анализе. Нейронные сети обучаются, запоминая калибровку всех исследуемых образцов и их эталонов. И если другие статистические модели обрабатывают данные последовательно, чтобы классифицировать наиболее близкий неизменный эталон запаха анализируемой пробе, то нейронные сети выполняют эти операции одновременно, чтобы установить «межклассы». Таким образом, нейросети обучаются непрерывно и гибко подстраиваются под те или иные условия распознавания запахов. К достоинствам нейронной сети как метода формирования суммарного отклика матрицы сенсоров относят также высокую скорость обработки сигналов.

Цель данной работы – обнаружение легких нефтепродуктов в почвах реального объекта после пожара с применением матрицы из трех разнородных пьезосорбционных сенсоров с последующей обработкой аналитических сигналов матрицы различными способами (сравнение «отпечатков запахов» и нейронная сеть).

Схема «электронного носа», принцип его действия и порядок проведения измерений подробно представлены в ранее опубликованных статьях [2, 4, 5]. Здесь отметим, что применяемая в работе матрица состояла из трех сенсоров, покрытых пленками сорбентов, которые значительно отличаются по полярности: I сенсор – многослойными углеродными нанотрубками (МУНТ); II – Тритоном Х-100 (ТХ-100); III – полиэтиленгликолем-2000 (ПЭГ-2000). Пробы почв отбирали в сухую погоду глубиной от 5 до 20 см. Преобладающий тип почв – чернозем выщелоченный, встречаются пробы с вкраплением песка и глины. Всего с территории исследуемого объекта было отобрано 9 проб: 1–3 в точках, которые априори загрязнены керосином (места скопления подземных линз топлива); 4–6 – на некотором удалении от керосиновых линз; 7–9 – почвы после интенсивного пожара.

На первом этапе работы готовили модельные смеси чистой почвы с керосином в интервале концентраций от 0 до 25000 мг/кг. Исследуемые концентрации обусловлены ранее проводимыми исследованиями на объекте [7], а также ориентировочно допустимой концентрацией легких нефтепродуктов в почвах (100 мг/кг), установленной экспериментально [8]. Также исследовали почвы, загрязненные другими летучими веществами (аммиак, ацетон, спирт), которые составили для обучения нейронной сети отдельную группу «загрязненные почвы не керосином» По результатам измерений построены градуировочные графики, показывающие зависимость величины аналитического сигнала пьезосенсоров ($\Delta F_{c(1\text{-}3)}$, Гц) от концентрации керосина в почве (C, мг/кг), которые приведены на рисунке 1.

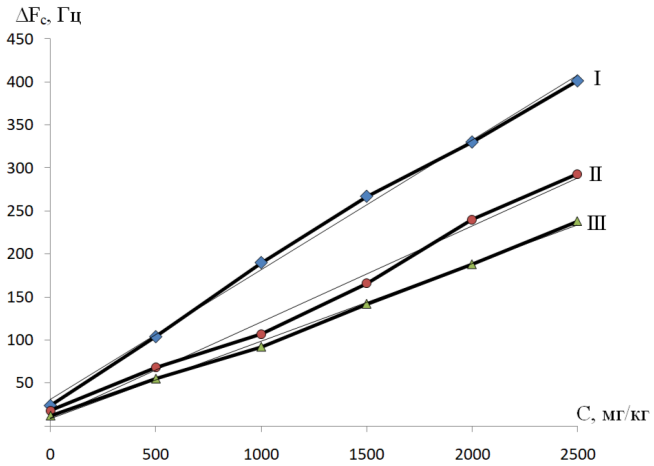


Рисунок 1 — Зависимость аналитических сигналов сенсоров на основе I – МУНТ, II – ТХ-100, III – ПЭГ-2000 от концентрации керосина в почве при температуре 22 °С.

При обучении нейронной сети использовали несколько качественных и количественных характеристик сорбции паров на разнородных пленках сорбентов пьезосенсоров. В базу данных вводили значения следующих параметров сорбции керосина на сорбционных покрытиях сенсоров I–III:

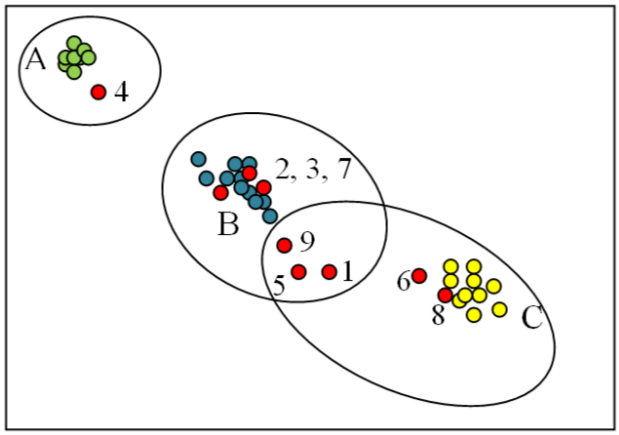
1. Аналитический сигнал сорбции паров керосина на пленке *i*-того пьезосенсора в матрице ΔF_{ci} (Гц) – изменение частоты колебаний пьезосенсора при экспонировании в парах анализируемого вещества с заданной концентрацией в течение времени τ=60 с;

2. Скорость сорбции вещества в определенный интервал времени $\Delta F_{c\,i}{}^{\tau}/\Delta\tau$ ($\Delta\tau$=5, 30, 60 с);

3. Время половинной сорбции $\tau_{1/2i}$ – время от начала сорбции до получения ½ значения ΔF_{ci}.

Для идентификации керосина в почве применяли алгоритм кластерного анализа k-means на базе общедоступной универсальной платформы ИИ Loginom. Метод k-means используют для кластеризации данных на основе алгоритма разбиения векторного пространства на заранее определенное число кластеров k. Алгоритм представляет собой итерационную процедуру. Сначала устанавливается число кластеров k, соответствующее количеству исследуемых вариантов: чистая почва; почва, загрязненная керосином; почва, загрязненная другими веществами. Из исходного множества результатов измерений (количественные и качественные характеристики сорбции 10 параллельных измерений) случайным образом программа выбирает k наблюдений, которые служат начальными центрами каждого кластера (в метрике Евклида) и вычисляет их центры тяжести.

Таким образом, центроид каждого кластера – вектор, элементы которого представляют собой средние значения соответствующих признаков, вычисленные по всем записям кластера. На каждой итерации происходит изменение границ кластеров и смещение их центров. В результате минимизируются расстояния между элементами внутри кластеров и увеличиваются расстояния между самими кластерами. Остановка алгоритма производится тогда, когда границы кластеров и расположения центроидов перестают изменяться от итерации к итерации. Затем в обученную программу вводили параметры сорбции паров над реальными образцами почв (рисунок 2).



A – чистые почвы; B – почвы, содержащие керосин с разными концентрациями;
C – загрязненные почвы (не керосином); 1 – 9 –образцы почв

Рисунок 2 — Кластеризация проб почв методом k-means в программе Loginom.

На основании проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

1) В пробах 1, 2, 3, 5, 7, 9 присутствует керосин;

2) Пробы 1, 5, 9 помимо керосина содержат другие летучие соединения, идентификация которых не входила в задачи проведенного исследования;

3) Проба 4 по составу газовой фазы наиболее близка к эталонной чистой почве;

4) Пробы 6 и 8 не содержат керосин (или содержат в незначительном количестве), однако они в значительной степени загрязнены другими летучими компонентами.

Вторым способом представления суммарного аналитического сигнала матрицы пьезосенсоров является построение в общедоступном приложении Word лепестковых диаграмм [9]. По лучам диаграмм поочередно для каждого сенсора I–III откладывали значения скоростей сорбции паров в определенный интервал времени $\Delta F_{c\,i}{}^{\tau}/\Delta\tau$ (Гц/с, $\Delta\tau$=5, 30, 60 с); аналитический сигнал сорбции паров за τ=60 с (ΔF_{ci}, КГц); время половинной сорбции ($\tau_{1/2i}$, с). Например, «II-5» показывает скорость изменения аналитического сигнала сенсора матрицы II через 5 с от начала сорбции. В результате получается индивидуальный для каждого вещества «отпечаток запаха». Чем больше отличается кинетика сорбции веществ на пленках выбранных сорбентов, тем ярче выражены различия между их «отпечатками запахов». На рисунке 3 представлены образцы отпечатков запахов модельных и реальных образцов почв.

Геометрия диаграммы – качественная характеристика микровзвешивания вещества. При изменении его концентрации форма диаграммы изменяется незначительно, но при этом изменяется ее площадь. При деструкции газов геометрия диаграммы изменяется во времени, при этом о скорости преобразования вещества можно судить по степени отклонения геометрии диаграммы от ее эталонного изображения. Это можно сделать с помощью любой программы распознавания образов, например, Difflmg [10].

С помощью построенного градуировочного графика (рисунок 1) в пробах, содержащих керосин, оценивали его концентрацию. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 — Концентрация керосина в исследуемых пробах почв.

Номер пробы	1	2	3	4	5	6	7	8	9
С, мг/кг	910±66	1020±28	1020±30	-	512±18	-	715±45	-	856±60

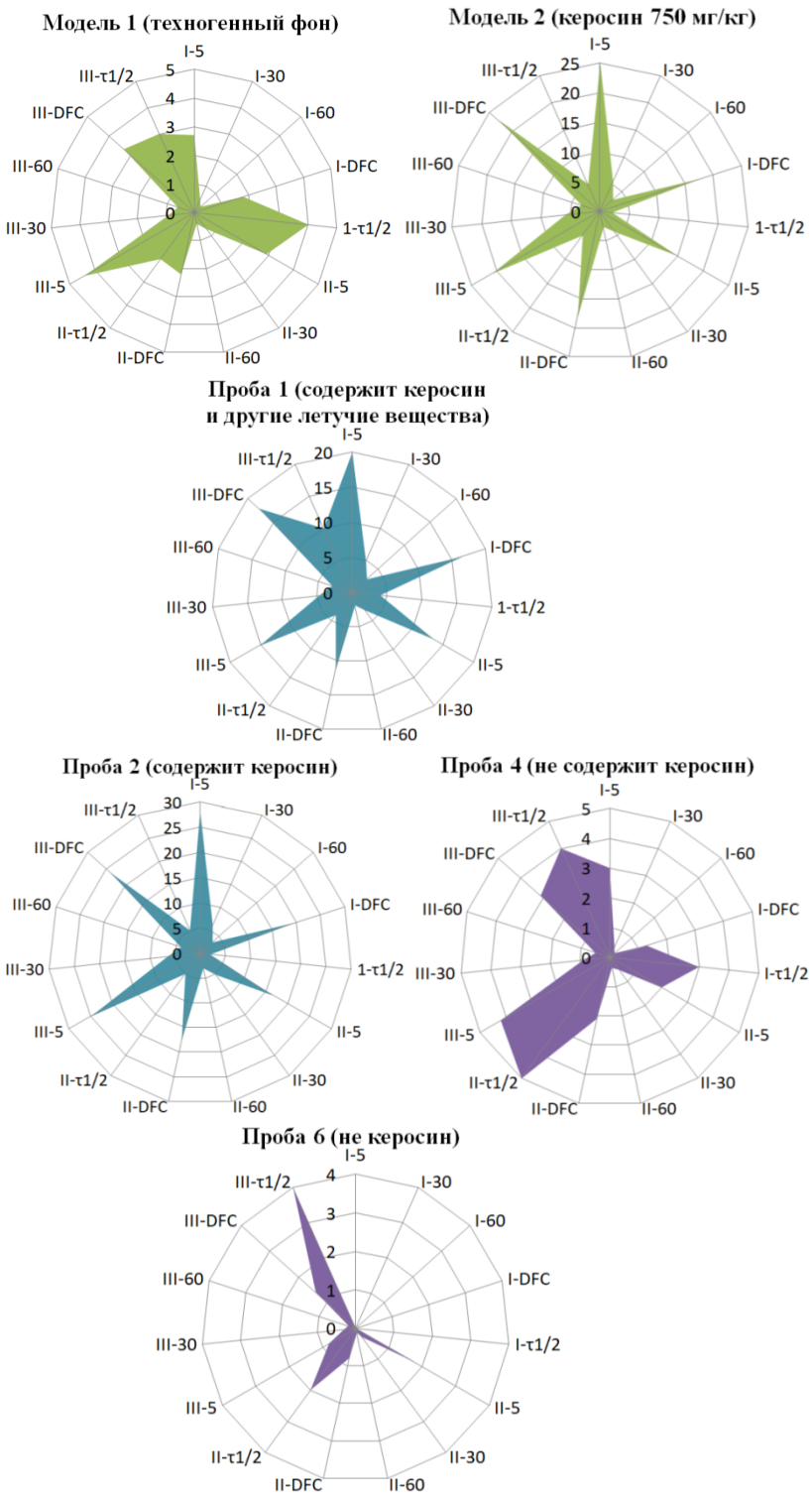


Рисунок 3 — «Отпечатки запахов» проб почв.

Выводы

Нейросеть отличает загрязненные керосином пробы почв от чистых почв с вероятностью не менее 99 %, а вещества, при наличии в пробах мешающих летучих компонентов, – с вероятностью 73 %. Способ распознавания «отпечатков запахов» по геометрии лепестковых диаграмм позволяет с вероятностью 99,9 % идентифицировать детектируемые вещества, а с помощью простейших программ сравнения образов оценить степень их деструкции с течением времени. При этом требуется меньше входящих параметров и затрат времени на формирование банка данных, чем при использовании нейросети. Однако

нейронная сеть будет незаменима при использовании матрицы пьезосенсоров «на месте», когда непредсказуемым образом изменяются параметры сорбции веществ из-за нестабильности условий окружающей среды.

С помощью электронного носа возможно также определение концентрации летучих загрязнителей почв. Установлено, что в приповерхностных почвах реального объекта концентрация керосина максимальна над линзами, она составляет >10 ПДК. На месте пожара концентрация керосина уменьшилась до 7–8,5 ПДК, то есть можно предположить, что пары легких нефтепродуктов продолжают диффундировать через слой грунта от линз, но уже с меньшей интенсивностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проблемы аналитической химии / Научный совет по аналитической химии ОХНМ РАН. М.: Наука, 2010. Т. 14: Химические сенсоры / под ред. Ю.Г. Власова. 2011. 399 с.

2. Кучменко Т.А., Кочетова Ж.Ю., Федорова Е.В., Бондарева Л.П., Шлык Ю.К., Коренман Я.И. Применение матрицы пьезосорбционных датчиков для анализа газовых этанолсодержащих смесей // Журнал прикладной химии. 2003. Т. 76. № 5. С. 746–770.

3. Сысоев В.В., Зюрюкин Ю.А. Мультисенсорные системы распознавания газов типа «Электронный нос»: краткий обзор литературы // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2007. Т.1. № 2. С. 111–119.

4. Кочетова Ж.Ю., Кучменко Т.А., Базарский О.В. Экспресс-оценка загрязнения грунтов керосином по сигналам пьезосенсора на основе многослойных углеродных нанотрубок // Вестник Московского университета. Серия 2: Химия. 2017. Т.58. № 1. С. 28–35.

5. Маслова Н.В., Кочетова Ж.Ю., Комплексный экспресс-анализ загрязнения вод // Региональные геосистемы. 2021 Т. 45. № 3. С. 382–392.

6. Галушкин А.И. Теория нейронных сетей. М.: ИПРЖР, 2000. 416 с.

7. Косинова И.И., Бударина В.А., Фонова О.Г., Долбилова С.В., Зинченко Е.В. Преобразование абиотических компонентов природной среды в районах длительно существующих объектов логистики нефтепродуктов // Вестник ВГУ. Серия: Геология. 2019. № 1. С. 88–92.

8. Рубин В.М., Ильюкова И.И., Кремко Л.М., Присмотров Ю.А., Самсонова А.С., Володько И.К., Лукашев О.В. Гигиеническое обоснование нормативов ПДК нефтепродуктов в почвах Республики Беларусь // Гигиена и санитария. 2013. № 92(2). С. 99–101.

9. Кочетова Ж.Ю., Кучменко Т.А., Карлов П.А., Тимошинов О.В. Применение восьмисенсорного «электронного носа» для оценки загрязнения воды керосином и ацетоном // Успехи современного естествознания. 2017. № 11. С. 12–17.

10. Судакова А.А. Исследование методов распознавания и классификации геометрических фигур на изображениях: выпускная квалификационная работа бакалавра: 02.03.01. Красноярск: СФУ, 2022. 48 с.

УДК 677.017.855 DOI: 10.37816/eeste-2024-1-230-234

ВЛИЯНИЕ ВИДА СПЕЦИАЛЬНОЙ ОТДЕЛКИ НА ХАРАКТЕР ИЗМЕНЕНИЯ АНТИСТАТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТКАНЕЙ В ПРОЦЕССЕ СТИРОК
INFLUENCE OF THE TYPE OF SPECIAL FINISHING ON THE NATURE OF FABRICS ANTISTATIC PROPERTIES CHANGES DURING WASHING PROCESS

Вероника Григорьевна Марченко, Дмитрий Борисович Рыклин
Veronika G. Marchenko, Dzmitry B. Ryklin

Витебский государственный технологический университет,
Республика Беларусь, Витебск
Vitebsk State Technological University, Republic of Belarus, Vitebsk
(e-mail: veronika1300@mail.ru, ryklin-db@mail.ru)

Аннотация: Целью работы является оценка влияния различных видов заключительной отделки на изменение антистатических свойств тканей для спецодежды после заданного количества стирок. Установлена зависимость удельного поверхностного электрического сопротивления от вида специальной отделки. Все исследуемые образцы после 20-ти стирок соответствуют нормируемому значению. Для определения причин изменения антистатических свойств проведен анализ структуры тканей до и после 20-ти стирок.

Abstract: The purpose of the work is to evaluate the influence of various types of final finishing on the change in the antistatic properties of fabrics for workwear after a given number of washes. The dependence of the specific surface electrical resistance on the type of special finishing has been established. All tested samples after 20 washes correspond to the normalized value. To determine the reasons for changes in antistatic properties, an analysis of the fabric structure was carried out before and after 20 washes.

Ключевые слова: специальная отделка, антистатические свойства, удельное поверхностное электрическое сопротивление, многократные стирки, структура тканей.

Keywords: special finishing, antistatic properties, specific surface electrical resistance, repeated washing, fabric structure.

В настоящее время важную роль занимает защита человека от вредных производственных факторов. Одним из таких факторов является накопление на тканях статического электричества, способного подвергнуть опасности жизнь и здоровье работника. С целью предотвращения возникновения таких рисков разрабатываются ткани с антистатическими свойствами. Одним из способов получения таких материалов является введение в их структуру электропроводящих компонентов. Зачастую, для большей функциональности, такие ткани подвергают различным специальным отделкам.

Специальные виды отделки применяют, во-первых, для снижения или устранения недостатков, присущих тканям определенного сырьевого состава (малосминаемая отделка, легкое глажение), во-вторых, для придания тканям важных свойств (водоотталкивающая и водонепроницаемая, антистатическая грязеотталкивающая, противомолевая, противогнилостная, огнезащитная отделка), в-третьих, для создания каких-либо эффектов, улучшающих эстетические свойства (стойкое тиснение, гофре, форниз, металлизация, флокирование, «СКЭТ», лаке, вытравной рисунок) [1].

Исследованию влияния вида отделки на свойства материалов посвящено множество публикаций. Так, в работе [2] проведен анализ влияния вида отделки ткани на её пожароопасные свойства. Установлено, что процесс термодеструкции для суровой ткани бязь начинается и заканчивается при меньших температурах, процент потери массы данного образца меньше, чем у образцов с отделкой. Для образцов, прошедших цикл отделки (беление, крашение, печать), данные показатели отличаются от образцов суровья, но внутри своей группы находятся в достаточно близких температурных и процентных диапазонах.

Что касается специальных видов отделок, в работе [3] оценено влияние антистатической обработки на напряженность электростатического поля и гигроскопичность синтетических тканей. Обнаружено, что ткани, необработанные антистатическими составами, имеют относительно высокий показатель напряженности электростатического поля, а у тканей, обработанных антистатиками, наблюдается снижение данного показателя. При этом выявлено, что антистатическая обработка тканей снижает показатель гигроскопичности.

Представляют интерес работы, в которых оценивается влияние обработок после процесса эксплуатации. В статье [4] дана оценка изменения защитных свойств после многократных стирок. Показатель огнестойкости после 50-ти стирок как у «огнестойких», так и у «неогнестойких» образцов остался прежним. Значение показателя стойкость к прожиганию после стирок уменьшается, что связано с вымыванием из тканей специальной пропитки. В результате исследования, по показателю маслоотталкивание, было выявлено, что после многократных стирок значения остаются прежними.

Однако в литературе редко можно найти работы, описывающие влияние специальных отделок на ткани, антистатические свойства которых обеспечиваются наличием в них электропроводящих компонентов, на характер изменения удельного поверхностного электрического сопротивления после многократных стирок. Исходя из этого целью данной работы является оценка влияния различных видов заключительной отделки на изменение антистатических свойств тканей для спецодежды после заданного количества стирок.

В качестве объекта исследования в данной работе выбраны ткани производства ОАО «Моготекс», содержащие антистатические нити/, в качестве которых выступала пряжа с вложением 10 % стального волокна Bekinox. Эти ткани имеют удельное сопротивление в диапазоне 10^4 – 10^6 Ом, что характеризует их как антистатические. Характеристика испытуемых образцов представлена в табл. 1.

Устойчивость защитных свойств материалов к мокрым обработкам (стиркам) определяется по ГОСТ 11209-2014. Многократные стирки проводились в стиральной машине автоматической бытовой с горизонтальным расположением барабана. Для проведения испытания использовался стиральный порошок универсальный без отбеливателей, энзимов, усилителей, отдушек, антистатических и других дополнительных веществ торговой марки Чистаун Organic.

Таблица 1 - Характеристика испытуемых образцов

Артикул	Поверх-ностная плотность, г/дм^3	Переплетение	Состав без учета антистатической нити	Свойства	Расположение антистатических нитей
06С27-КВ	263	Саржа 2/2	хлопок –74%; полиэфирное волокно – 26%	– масловодоотталкивающая отделка; – нефтемасловодоотталкивающая отделка	Сетка, размер ячейки 10×10 мм
14С5-КВ	271	Саржа 3/1	хлопок – 42 %; полиэфирное волокно – 58 %		Расположение вдоль основы с шагом 10 мм
18С12-КВ	197	Саржа 2/2	полиэфирное волокно – 100 %	– кислотозащитная отделка от воздействия кислот 80-% концентра-ции	Расположение вдоль утка с шагом 10 мм
03С8-КВК	232	Саржа 3/1	хлопок –67%; полиэфирное волокно – 33%	– масловодоотталкивающая отделка; – нефтемасловодоотталкивающая отделка; – пленочное полиуретановое микропористое «дышащее» покрытие	Расположение вдоль основы с шагом 18 мм

Глажение образцов проводилось непосредственно после отжима при использовании электрического утюга. Температура глажения ткани соответствовала виду используемого

сырьевого состава. Далее образцы высушивались в сушильном шкафу и выдерживались в нормальных условиях.

Удельное поверхностное электрическое сопротивление образцов тканей определяется по ГОСТ 19616-74. Данный показатель определялся с помощью прибора ИЭСТП-2. Образцы испытывались до стирок, с первой по десятую стирку после каждой, а также после 15-й и после 20-й стирки.

Результаты испытаний антистатических тканей представлены на рисунке 1.

Можно отметить, что и после 20 стирок исследованные образцы соответствуют требованиям, предъявляемым к тканям для спецодежды для защиты от статического электричества, которые приведены в ГОСТ 12.4.124-83. В соответствии с этим стандартом удельное поверхностное электрическое сопротивление для материалов, применяемых для спецодежды, не должно превышать 10^7 Ом.

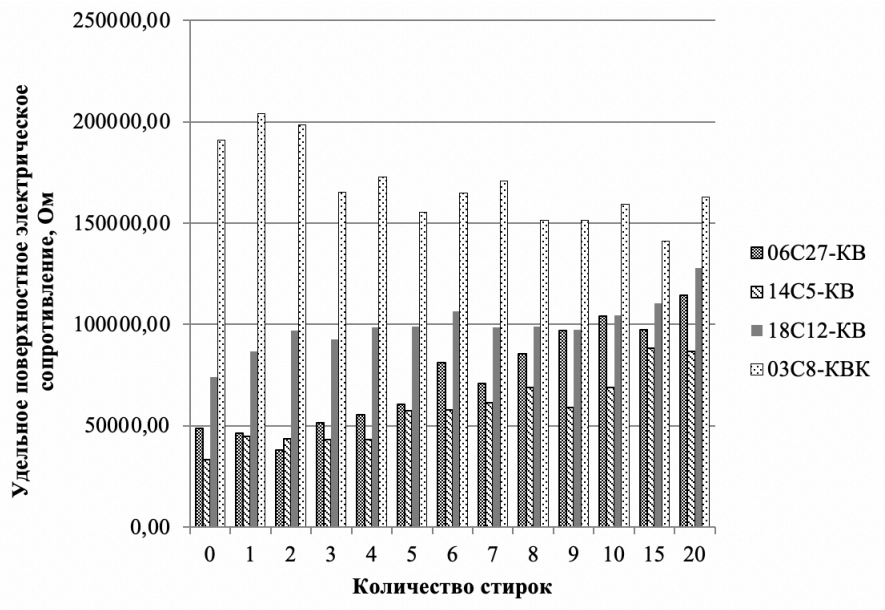


Рисунок 1 — Влияние вида отделки и количества стирок на удельное поверхностное электрическое сопротивление образцов антистатической ткани

На рисунке 1 можно заметить постепенное увеличение удельного поверхностного электрического сопротивления с увеличением числа стирок у всех образцов, за исключением образца 03С8-КВК, содержащего пленочное полиуретановое микропористое «дышащее» покрытие. Для данного образца характерно снижение удельного поверхностного электрического сопротивления с увеличением числа стирок, что говорит о том, что антистатические свойства несколько повышаются. Возможно, это связано с тем, что данное отделочное покрытие частично удаляется с увеличением циклов стирок и, следовательно, увеличивается зона контакта стальных волокон между собой в структуре нитей, между нитями, а также с датчиком прибора.

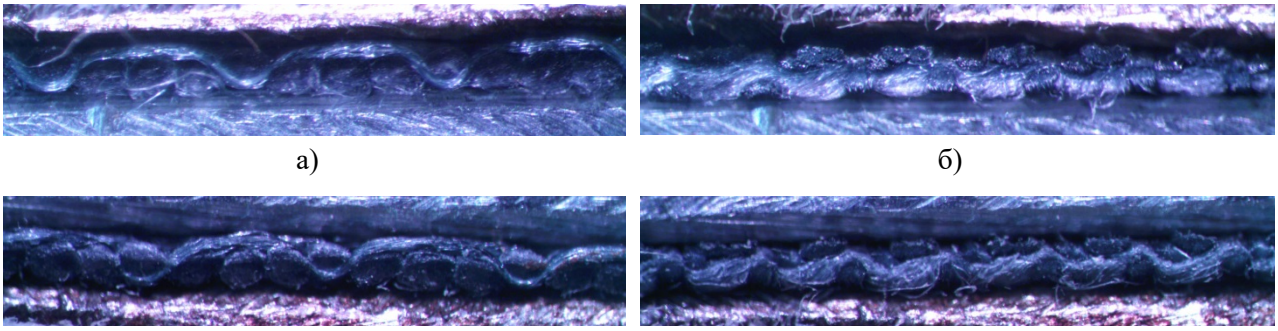
В соответствии с ГОСТ 11209-2014 определение значения удельного поверхностного электрического сопротивления проводят после 5-ти кратной стирки. Исходя из полученных данных, можно сделать вывод о том, что все образцы являются антистатическими даже спустя количество циклов, существенно превышающее указанное значение.

Важно обратить внимание на то, что показатель «удельное поверхностное электрическое сопротивление тканей» характеризуется высокой вариативностью. В международном стандарте ГОСТ EN 1149-1-2018 «Одежда специальная защитная. Электростатические свойства. Часть 1. Метод испытания для измерения удельного поверхностного сопротивления» указывается на то, что применяемый метод дает расхождение результатов измерений между разными испытательными лабораториями вплоть до 10 раз, то есть до 1 порядка. При испытании проб тканей разброс получаемых значений оказался

значительным, максимальное значение показателя в некоторых случаях превышает минимальное в 5-8 раз.

В работе [5] осуществлялась оценка значимости установленных различий исследуемого показателя между стирками с применением U-критерий Манна-Уитни. Следует отметить, что различия исследуемого показателя между последовательными стирками оказались несущественными. Однако установлено, что происходит накопление незначительных изменений в свойствах тканей, в результате которого изменения становятся статистически значимыми. Нужно отметить, что для образца 06С27-КВ различия становятся значимыми после 9-ой стирки, для образцов 14С5-КВ и 18С12-КВ – после 5-ой стирки, для образца 03С8-КВК – после 8-ой стирки.

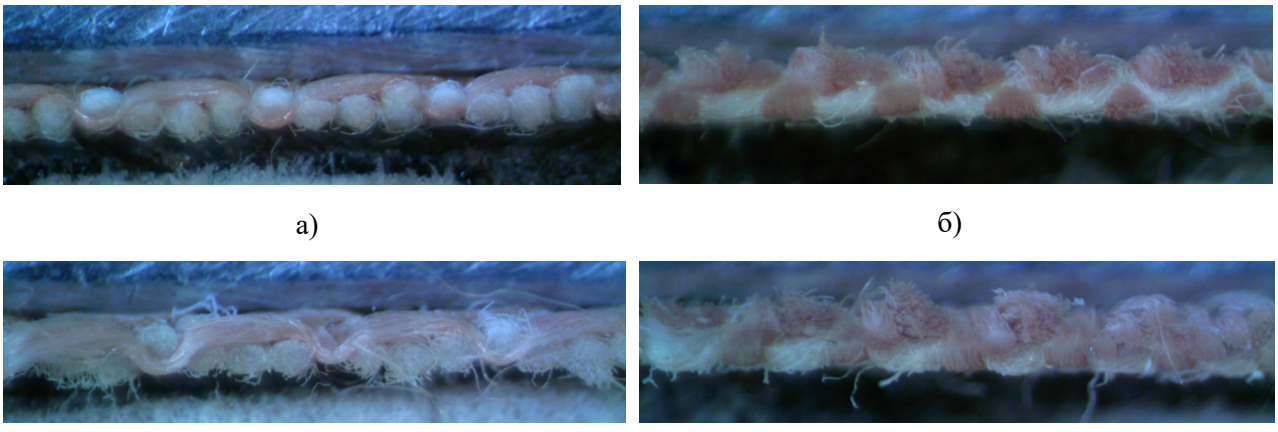
Для определения причин снижения антистатических свойств тканей специального назначения проведены исследования структуры материалов до стирок и после 20-ти циклов. Для образцов с помощью микроскопа (увеличение в 55 раз) были сделаны фотографии срезов ткани вдоль нитей основы и вдоль нитей утка до и после 20-ти стирок (рис. 2-3).



а) б)

в) г)

Рисунок 2 — Фотографии срезов ткани образца 03С8-КВК:
а) вдоль основы до стирок; б) вдоль утка до стирок;
в) вдоль основы после 20-ти стирок; г) вдоль утка после 20-ти стирок



а) б)

в) г)

Рисунок 3 — Фотографии срезов ткани образца 14С5-КВ:
а) вдоль основы до стирок; б) вдоль утка до стирок;
в) вдоль основы после 20-ти стирок; г) вдоль утка после 20-ти стирок

В результате анализа полученных фотографий срезов тканей установлено, что структура в образцах остается стабильной даже после многократных стирок: порядок фазы строения соответствует IV порядку [6]. Стоит отметить, что после 20-ти стирок увеличивается

ворсистость нитей как основы, так и утка. Однако в образце 03С8-КВК ворсистость нитей изменилась незначительно, что, возможно, связано с наличием пленочного полиуретанового микропористого «дышащего» покрытия. Данный фактор также мог повлиять на характер изменения антистатических свойств. С целью подтверждения данной гипотезы исследования данного образца будут проводится далее при большем количестве циклов стирок.

Выводы

Удельное поверхностное электрическое сопротивление всех исследованных образцов тканей, содержащих стальное волокно Bekinox, соответствует нормируемому значению после 20-ти кратной стирки.

Для образцов 06С27-КВ и 14С5-КВ, подвергнутых масловодоотталкивающей и нефтемасловодоотталкивающей отделке, характер изменения антистатических свойств схож. Удельное поверхностное электрическое сопротивление этих тканей постепенно повышается с увеличением количества циклов стирок. Для образца 18С12-КВ с кислотозащитной отделкой тенденция снижения антистатических свойств выражена в меньшей степени.

Для образца 03С8-КВК, содержащего пленочное полиуретановое микропористое «дышащее» покрытие, характерно снижение удельного поверхностного электрического сопротивления с увеличением числа стирок, что говорит о том, что антистатические свойства несколько повышаются. Вероятной причиной данной тенденции является частичное удаление отделочного покрытия с увеличением циклов стирок, вследствие чего увеличивается зона контакта стальных волокон между собой в структуре нитей, между нитями, а также с датчиком прибора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Неверов А.Н., Пехташева Е.Л., Райкова Е.Ю.* и др. Идентификационная и товарная экспертиза одежно-обувных и ювелирных товаров: учебник. М.: ИНФРА-М, 2014. 472 с.

2. *Спиридонова В.Г., Циркина О.Г., Шабунин С.А.* Влияние вида отделки на пожароопасные свойства текстильных материалов из хлопковых волокон // Сборник материалов IX Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 90-летию образования гражданской обороны «Актуальные вопросы совершенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов». И.: ФГБОУ ВО Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2022. С. 400-404.

3. *Миролюбов Ю.Б.* Оценка напряженности электростатического поля и гигроскопичности синтетических тканей после антистатической обработки // Материалы XI Международной молодежной научной конференции. В 6-ти томах. Том 6. Отв. редактор М.С. Разумов «Молодежь и XXI век - 2021». Курск: Юго-Западный государственный университет, 2021. С. 415-417.

4. *Давыдов А.Ф., Шампарова Н.В.* Влияние многократных стирок на основные показатели тканей специального назначения согласно ТР ТС 019/2011 // Сборник трудов по итогам работы Круглого стола с международным участием «Актуальные проблемы экспертизы, технического регулирования и подтверждения соответствия продукции текстильной и легкой промышленности». М.: ФГБОУ ВО "РГУ им. А.Н. Косыгина", 2021. С. 33-38.

5. *Марченко В.Г., Рыклин Д.Б.* Оценка влияния стирок на антистатические свойства тканей для спецодежды // Вестник Витебского государственного технологического университета. 2023. №45. С.17-26.

6. *Мартынова А.А., Слостина Г.Л., Власова Н.А.* Строение и проектирование тканей. М.: РИО МГТА, 1999. 434 с.

УДК 628 DOI: 10.37816/eeste-2024-1-235-238

ПОВТОРНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТБО: ПЕРСПЕКТИВЫ И СЛОЖНОСТИ
MSW REUSE: PROSPECTS AND CHALLENGES

Александр Игоревич Караваев, Ольга Геннадьевна Любская
Alexander Igorevich Karavaev, Olga Gennadievna Lyubskaya

Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), Россия, Москва
The Kosygin State University of Russia, Russia, Moscow
(e-mail: 231554@stud.rguk.ru, lyubskaya-og@rguk.ru)

Аннотация. В статье рассмотрены перспективы и сложности повторного использования ТБО в РФ, представлена мотивация к изменению отношения к отходам от мусора к ресурсу, показана важность взаимодействия государственных структур на всех уровнях иерархии власти.

Abstract. The article examines the prospects and difficulties of reusing solid waste in the Russian Federation, presents the motivation for changing the attitude towards waste from garbage to a resource, and shows the importance of interaction between government structures at all levels of the power hierarchy.

Ключевые слова: обращение с отходами, повторное использование отходов, законодательство, «мусорная реформа».

Keywords: waste management, waste reuse, legislation, “garbage reform”.

Борьба с отходами на нашей планете с каждым годом становится все более серьезной и начинает быть одним из базовых направлений мировой экологической политики. Человечеству приходится объединяться в борьбе за здоровую природную среду и чистые территории для своего проживания.

Современный этап, проживаемый человечеством, характеризует катастрофический по скорости процесс накопления твердых бытовых отходов (ТБО), что вызывает необходимость захватывать все новые и новые территории для организации полигонов под его захоронение.

В течение каждого календарного года в России образуется около 8 млрд тонн отходов, из которых используется или перерабатывается порядка лишь 2 млрд тонн, что составляет около 28,6% от общего количества отходов [1], остальные захораниваются на мусорных свалках.

На сегодняшний день полигоны оборудованы такими образом, что степень взаимодействия отходов с окружающей средой является минимальной. С одной стороны, данный факт является неоспоримым преимуществом, однако при более детальном изучении вопроса становится понятно, что в долгосрочной перспективе данные захоронения становятся «бомбой замедленного действия».

Это обусловлено тем, что при такой форме обращения с отходами концентрация кислорода является почти минимальной. Данные обстоятельства приводят к началу «брожения» отходов, в процессе которого выделяются метан и угарный газ. Их смесь образует соединение, именуемое «свалочным» газом. Также «брожение» отходов приводит к образованию фильтрата – опасного загрязняющего вещества, которое при попадании в недра планеты способно отравлять водоемы или подземные воды. Загрязнение водных ресурсов неминуемо приводит к экологической катастрофе.

Необходимость перехода от повсеместного захоронения к технологиям ресурсосбережения, обработки, утилизации и обезвреживания отходов как от жилого сектора, так и от промышленных предприятий продиктованы катастрофическим по масштабам негативным влиянием на окружающую природную среду и здоровье граждан нашей страны.

Российская Федерация отстает от мировых тенденций по рециклингу мусора ввиду отсутствия эффективно организованной системы раздельного сбора отходов, а также промышленных комплексов для последующей обработки, утилизации и обезвреживания отходов в промышленном масштабе с целью вовлечения утильных фракций в повторный хозяйственный оборот.

Начатая в 2017 году реформа отрасли обращения с отходами, в настоящее время испытывает определенные пробуксовки. В этой работе основным и **актуальным** является выявление проблем в действующей системе обращения с отходами и разработка механизмов ее совершенствования.

Реализация поставленной цели предусматривает решение следующих задач:

изучение теоретической базы управления отходами производства и потребления;

изучение законодательства, регулирующего сферу обращения с отходами в РФ;

анализ системы обращения с отходами в рамках муниципального образования и оценка его эффективности.

Основным нормативным правовым документом, давшим начало реформированию системы обращения с отходами в РФ, является ФЗ [2], в котором определены основные понятия, цели и принципы государственной политики в сфере их обращения, а также терминология, правовые основы в сфере нормирования, государственного учета и отчетности, требования экологического контроля. Согласно данному закону по-новому трактуется понятие «отходов», определен порядок выбора регионального оператора (обязательно на конкурсной основе), утвержден регламент разработки и принятия территориальной схемы обращения с отходами (на основе общественного обсуждения).

В последние годы российское законодательство существенно расширяется и обновляется в связи с перераспределением полномочий в области охраны окружающей среды между федеральными и региональными органами власти, а также между различными федеральными ведомствами. В РФ новым этапом в сфере оказания услуг по обращению с отходами считается принятие двух основополагающих документов [3, 4]. Именно эти законодательные акты в рамках реформирования законодательства переводят ТБО в ТКО и определяют порядок и правила определения нормативов накопления твёрдых коммунальных отходов.

Отвечая современным вызовам по обращению с отходами производства и потребления, законодательно определяются полномочия операторов по транспортировки ТКО, четко прописываются их обязанности и права.

Доказано экспертами всего мирового сообщества, что ТКО по своим составам являются источниками ценных материалов, которые при разделении могут приносить существенные экономические и экологические выгоды. В качестве примера: использование вторичного сырья дает возможность предприятиям, производящим упаковку, существенно снижать издержки, экономия от использования вторичного сырья при производстве упаковки составляет в среднем более четверти процентов от себестоимости. А снижение расходов при использовании стеклобоя для производства стекла может составлять до половины процентов. При этом возможно получение дополнительного тепла из переработанных материалов [5].

Основной сложностью при создании комплексов по утилизации ТБО состоят в низком уровне тарифов за сдачу отходов на утилизацию. Этот вопрос определяется, как наиболее сложным в переговорах хозяйствующих субъектов с местными администрациями, поскольку повышение тарифов, в частности, для населения относится к разряду социально-политических вопросов. И этот момент является тем краеугольным камнем проблемы, из-за которого в основном буксует продвижение реформы отношения к ТКО как к ресурсу.

В главных перспективах ***повторного использования ТКО*** в нашей стране определены следующие направления:

- введение расширенной ответственности производителей;
- управление жизненным циклом продукции от производства до ее утилизации;

– разработка специальных требований и правил к сбору, накоплению, транспортированию, обезвреживанию и размещению отдельных групп однородных отходов;
– обеспечение раздельного сбора макулатуры, металла, пластика, стекла.

Ключевыми направлениями государственной политики в сфере повышения экологической безопасности страны является сокращение объемов отходов, возникающих в процессе производства и потребления, и повышение уровня их переработки. Достижение данной цели возможно за счет развития инфраструктуры обращения с отходами, их утилизации, а также повторного использования в производстве. Для этого государством начато оснащение регионов объектами, которые создаются с учётом всех современных экономических и технологических требований. Основными функциями данных объектов являются: размещение, утилизация, переработка, обезвреживания, повторное применения отходов.

В таблице 1 представлены предполагаемые целевые показатели по обезвреживанию, утилизации и размещению ТКО в г. Москве на период до 2029 года.

Таблица 1 – Целевые показатели ТКО (до 2029 г.)

Показатели ТКО	**2023**	**2024**	**2025**	**2026**	**2027**	**2028**	**2029**
Доля обработанных ТКО в общем количестве образованных ТКО (процентов), не менее	55,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0
Доля утилизированных ТКО в общем количестве образованных ТКО (процентов), не менее	33,0	36,0	36,0	36,0	36,0	36,0	36,0
Доля обезвреженных ТКО в общем количестве образованных ТКО (процентов)*, не менее	12,7	16,7	17,6	17,3	16,9	17,0	16,7
Доля захороненных ТКО в общем количестве образованных ТКО (процентов), не более	67,0	64,0	64,0	64,0	64,0	64,0	64,0

*ТКО, обезвреженные на заводах термического обезвреживания с производством тепла и электроэнергии также учтены в целевом показателе «Доля утилизированных твердых коммунальных отходов в общем количестве образованных твердых коммунальных отходов (процентов)».

Из таблицы видно, что по расчету официальных источников доля обработанных, утилизированных, обезвреженных и захороненных отходов практически не изменяется. И это планирование касается крупнейшего мегаполиса нашей страны – столицы нашего государства.

Наибольшей эффективности реализации государственных программ возможно достичь при реализации финансовых механизмов, заключающихся в дотировании регионов, применении налоговых и неналоговых льгот, а также иных форм экономической и законодательной поддержки.

«Мусорная» реформа была начата в рамках национального проекта «Экология», целью которого планировалось создание высокотехнологичной инфраструктуры обработки и утилизации ТКО в России. Однако, согласно Отчету о результатах экспертно-аналитического

мероприятия «Анализ выполнения мероприятий, обеспечивающих экологическую безопасность Российской Федерации, в части ликвидации объектов накопленного вреда и формирования комплексной системы обращения с твердыми коммунальными отходами, на конец 2020 года проект с задачей не справляется, поскольку выявил «слабые» места, требующие пересмотра нескольких заложенных параметров, а именно:

отсутствие предусмотренных мер, направленных на предотвращение и сокращение объемов образования отходов;

размеры финансирования данной программы для регионов не отвечают реальным требованиям, например, в 31 регионе нашей страны исчерпаны проектные мощности существующих полигонов, а возможности создания новых не существует;

при не созданной инженерно-технической структуры для сортировки и переработки мусора невозможно подвергнуть рециклингу 61% мусора, как это заложено в программе;

Сочетание таких фактов, как прежние объемы производства отходов, отсутствие структуры по сбору и переработке, скудное финансирование на разворачивание новых оборудованных полигонов, приводит к тому, что ликвидировать имеющиеся свалки в черте городских округов (а их насчитывалось 8 325 на момент начала проекта) абсолютно невозможно. Удалось закрыть лишь около 200. Поставленная Президентом РФ цель – ликвидировать все свалки в границах городов – не достижима.

В заключение следует сказать, что, по мнению специалистов, основными направлениями минимизации объемов образования твердых бытовых коммунальных отходов в системе управления отходами являются сортировка и переработка отходов на предприятии и внедрение технологий замкнутого цикла на уровне региона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Караваев А.И., Кузьмин Р.М., Любская О.Г. «Современный подход к управлению твердыми бытовыми отходами (ТБО)» // Тенденции развития науки и образования №83, Март 2022 (Часть 2), с. 11-15.

2. Федеральный закон от 24.06.1998 № 89 (в ред. от 21.11.2011) «Об отходах производства и потребления» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.consultant.ru;

3. Постановление Правительства РФ от 12.11.2016 N 1156 "Об обращении с твёрдыми коммунальными отходами и внесении изменения в Постановление Правительства Российской Федерации от 25 августа 2008 г. N 641;

4. Постановление Правительства Российской Федерации от 04.04.2016г. № 269 «Об определении нормативов накопления твердых коммунальных отходов»;

5. Г.В. Рыбкина, А.А. Яблокова. Современное состояние теплоснабжения и его развитие / Промышленные процессы и технологии. – 2021.– Т 2 № 2 № 2(4) (2022), с. 89-99.

УДК 658.5: 621.311.2 DOI: 10.37816/eeste-2024-1-239-243

СОВРЕМЕННЫЕ РИСКИ В ВЕТРОЭНЕРГЕТИКЕ РОССИИ
MODERN RISKS IN WIND ENERGY OF RUSSIA

Людмила Вениаминовна Нефедова*, Дмитрий Александрович Соловьев**
Liudmila V. Nefedova*, Dmitry A. Solovyev**

** Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Россия, Москва*
** Lomonosov Moscow State University, Russia, Moscow*
(e-mail: nefludmila@mail.ru)
*** Объединенный институт высоких температур РАН, Россия, Москва*
***Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Russia, Moscow*
(e-mail: solovev@ocean.ru)

Аннотация: Проведен анализ современных проблем и возникших рисков в создании и при эксплуатации ВЭС в последние три года. Выделены области рисков, обусловленные уходом иностранных компаний, резким ростом доли ВЭС в электросетях России и особенно ЮФО, а также возросшие киберриски. Показана необходимость повышения локализации производства компонентов ВЭУ, применения нейросетей в прогнозах выработки ЭЭ на ВЭС и усиления мер кибербезопасности для снижения выделенных новых рисков.

Abstract: An analysis of modern problems and emerging risks in the creation and operation of wind farms in the last three years has been carried out. Areas of risks caused by the departure of foreign companies, a sharp increase in the share of wind farms in the power grids of Russia and especially the Southern Federal District, as well as increased cyber risks are highlighted. The need to increase the localization of production of wind turbine components, the use of neural networks in forecasting energy production at wind farms, and strengthening cybersecurity measures to reduce identified new risks is shown.

Ключевые слова: ветроэнергетика, риск-менеджмент, электросети, киберриски, нейронное прогнозирование.

Keywords: wind energy, risk management, power grids, neural forecasting, cyber risks,

Ветроэнергетика получает все более широкое развитие как в мире, так в России в связи с ее значительным потенциалом в обеспечении устойчивого энергоснабжения и снижении выбросов углекислого газа. К 2035г. по утвержденным Правительством РФ планам развития оптового и розничного рынка ВИЭ генерации суммарная установленная мощность достигнет порядка 17 ГВт (составит до 6% в совокупной мощности энергосистемы РФ), в том числе ветроэнергетика – около 8 ГВт. [1]. В России к началу 2020 г. в эксплуатации были всего около 200 МВт ветроэнергетических мощностей (включая ВЭС Крыма), далее за два года были достигнуты значительные успехи в этой отрасли. И к 1.01.2022г. суммарная установленная мощность ВЭС в стране составила уже 2108 МВт, то есть за 2 года рост – в 10 раз. Были созданы предприятия по производству отечественных ключевых узлов ВЭУ в г.Волгодонск корпорации НоваВинд (дивизион ГК «Росатом»), а также турбин, лопастей, башен ВЭУ с участием таких крупных международных компаний как Vestas и Siemens Gamesa. К началу второго полугодия 2023г. суммарная мощность ВЭС в РФ по программе ДПМ-1 (Программа государственной поддержки возобновляемой энергетики) составляла лишь 2360 МВт. В течении 2022г. в связи с принятыми против РФ экономическими санкциями резко возросли риски дальнейшего развития ветроэнергетики в нашей стране: иностранные компании остановили поставки лопастей и др. деталей, а заморозили производство компонентов ВЭУ на территории РФ. За полтора последних года по Программе ДПМ – 1 АО «НоваВинд» были введены в строй в Берестовская ВЭС (60 МВт – декабрь 2022г.) и Кузьминская ВЭС (160 МВт

– июнь 2023г). а также с мая 2023 г. вопреки санкциям и благодаря усилиям российских инженеров и строителей начала работу в полном объеме Кольская ВЭС (202,35 МВт) - первая в Единой Энергосистеме России ветровая станция, подключенная к системе автоматического регулирования частоты [2].

Создавшая ситуация в производстве ВЭУ показала высокие риски зависимости от иностранных производителей и поставщиков оборудования. Данные риски могут быть оценены как «политические» в разработанном нами реестре рисков в возобновляемой энергетике [3], поскольку были вызваны изменение политической ситуации в мире и явились результатом санкционного давления западных стран на Россию. Однако необходимо отметить и перспективный позитивный эффект, поскольку ситуация в ветроэнергетике после ухода иностранных компаний стала стимулом для поиска альтернативных поставщиков и стратегических партнерств в области технологий и компонентов ВЭУ, а также открыла перспективы для развития отечественного производства компонентов ветроагрегатов. На ряде предприятий (Завод «Силовые машины» и др.) ведутся разработки отечественных узлов ВЭУ. АО «НоваВинд» инвестирует 2 млрд. руб. в создание производства лопастей ВЭУ разных типов на заводе в г. Ульяновск, где выпускала лопасти ушедшая из РФ датская Vestas. По проведенным НП «Совет рынка» отборам проектов строительства ВЭУ в рамках ДПМ -1 и ДПМ -2 уже составлены конкретные планы ввода в строй ряда ВЭС и достижения к 2029г. суммарной мощности в 5,5 ГВт [4].

При действующих в РФ Государственных мерах поддержке по «Программам ДПМ 1 и 2 развития возобновляемой энергетики», ветроэнергетика сопряжена с рядом рисков, включая технологические, экологические, финансовые и регуляторные аспекты, влияющие на привлекательность и успешное продвижение проектов в этой области. Ключевым аспектом управления рисками в ветроэнергетике является их идентификация, оценка и минимизация на всех этапах жизненного цикла проекта - от технико-экономического обоснования и проектирования до строительства, эксплуатации и технического обслуживания ветроэнергетических объектов. Снижение рисков, в свою очередь, помогает повысить и инвестиционную привлекательность проектов в этой сфере и облегчить доступ к заемному капиталу [5, 6].

Анализ иностранных и отечественных публикаций позволил нам выделить ряд экономических и технических факторов рисков и методов их снижения (табл.1).

Таблица 1 – Основные факторы риска и способы управления ими в ветроэнергетике.

Основные факторы рисков	Возможности управления рисками
Длительные сроки окупаемости и высокие первоначальные затраты	Активные организационные меры по подготовке проекта ВЭС (разрешение на землеотвод, подготовка площадки, инфраструктуры)
Критические технические сбои компонентов (шестерни, подшипники, лопасти и др.).	Получение гарантий от надежных поставщиков компонентов
Изменчивость ветроресурсов.	Уточнение и моделирование характерстик ветровых ресурсов Получение долгосрочных контрактов
Необходимость дорогостоящих работ по подсоединению ВЭС к энергосистемам	Доступность и надежность ЛЭП для обеспечения потерь передачи энергии
Возгорания на ВЭУ, приводящие к авариям и прерываниям в производстве электроэнергии'	Разработка и реализация мер по обеспечению пожарной безопасности (регулярные проверки и техническое обслуживание оборудования.

Значимыми являются и риски, обусловленные проблемами интеграции объектов на ВИЭ в современные энергосистемы России, сложностью краткосрочного прогнозирования объемов выдачи мощности выработанной на ВЭС и СЭС электроэнергии. Несмотря на небольшие текущие объемы возобновляемой генерации в целом по ЕЭС России, уже сегодня в отдельных региональных энергосистемах доля выработки ВИЭ достигает системно значимых показателей, которые оказывают существенное влияние на работу энергосистемы. Например, доля выработки ВИЭ в Астраханской энергосистеме уже составляет величину порядка 32%, а в энергосистеме Калмыкии выработка ВИЭ за год превышает объем потребления. В целом в ОЭС Юга доля СЭС и ВЭС в структуре суточной выработки в отдельные дни превышает 12% [7]. Для снижения рисков необходимо создание систем прогнозирования выработки ВЭС, обеспечивающих возможность управления режимами энергосистем с большой долей ВИЭ, а также их размещение с учетом решения задач по оптимальному использованию и развитию сетевой инфраструктуры, а также поддержанию ресурсов регулирования в энергосистеме.

Увеличение доли объектов на ВИЭ в энергопроизводстве требует развития так называемых «быстрых рынков» и рыночных механизмов, предусматривающих на краткосрочных, в том числе внутричасовых периодах торговлю электроэнергией, вырабатываемой с участием ВЭС. Это значительно снизит экономические риски неэффективной работы ВЭС в сети, позволяя определить требуемые объемы резервирования мощности для компенсации отклонений в работе объектов ветроэнергетики и пропускной способности сети. Для краткосрочного прогнозирования выработки и выдачи мощности на солнечных и ветровых станциях ведутся разработки анализа временных рядов с применением искусственных нейросетей [8].

В последние годы большое значение в безопасности работы объектов возобновляемой энергетики приобретают киберриски. Современные цифровые технологии несут в себе помимо больших возможностей для развития отрасли и риски создания кибератак. Многие из генерирующих объектов ветроэнергетики напрямую подключены к региональной или национальной интернет-сети. И большинство из них теперь имеют интеллектуальные системы, позволяющие владельцам и операторам управлять ими удаленно. Все это повышает опасности сбоев в работе ВЭС за счет «внешнего» вмешательства. Наличие на пунктах управление ВЭС специалистов в области кибербезопасности, строгое соблюдение необходимых правил работы в этом плане сотрудниками значительно снижает, но полностью не исключает данный вид рисков.

Для снижения финансовых рисков и оптимизации функционирования ветроэнергетики в России очень важны существующие меры Государственной поддержки, обеспечивающие реализацию выработанной электроэнергии в Единую энергосистему России. Однако на современном этапе декарбонизации экономики в мире для ряда предприятий и структур, особенно при экспортных операциях, важным является заключение свободных двухсторонних договоров (СДД) на поставки «зеленой» электроэнергии от объектов на ВИЭ, в том числе ВЭС. Последние годы доля выработки возобновляемой электроэнергии по таким договорам возросла в России до 18% (рис.1).

Данная тенденция может свидетельствовать о снижении финансовых рисков работы ВЭС после окончания Программ ДПМ, поскольку СДД обеспечивают реализацию электроэнергии от объектов ВИЭ независимо от государственной политики в отношении поддержки возобновляемой энергетики.

Составленный нами реестр основных видов рисков в ветроэнергетике на современном этапе представлен в таблице 2. Важно отметить, что ресурсные риски в ветроэнергетике имеют как внутреннюю, так и внешнюю составляющие. Риск дефицита ветровых ресурсов для обеспечения рентабельности проекта обусловлен неравномерностью распределения ветрового потенциала во времени и пространстве. Однако, проведение дополнительного мониторинга скорости ветра, а также точный подбор параметров ветровых турбин, позволяющих достичь

максимального коэффициента использования установленной мощности (Киум), может значительно снизить данный вид рисков.

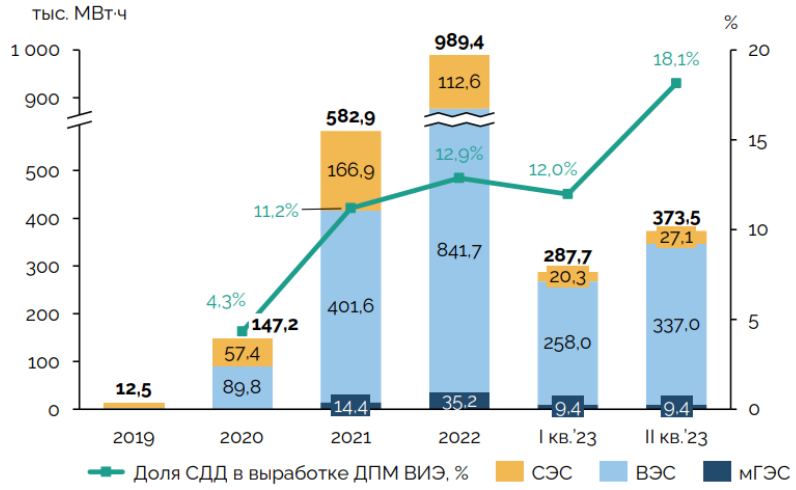


Рисунок 1 — Объемы электроэнергии, поставляемые на основе СДД ВИЭ, заключенных за соответствующий период, МВт·ч [7, 9].

Таблица 2 – Реестр основных видов рисков в сетевой ветроэнергетике России.

№	Вид риска	Описание риска	Возможные методы управления рисками
1	Ресурсный риск	Неравномерное распределение ветрового потенциала во времени и пространстве	Проведение дополнительных измерений ветровой активности, точный подбор параметров ветровых турбин
2	Технические риски	Сбои компонентов ветровых турбин, такие как шестерни, подшипники, лопасти и т.д.	Выбор надежных поставщиков компонентов, регулярное техническое обслуживание,
3	Экологические риски	Возможные негативные воздействия на окружающую среду	Экологическое мониторинг и соблюдение экологических стандартов
4	Финансовые риски	Длительные сроки окупаемости и высокие первоначальные затраты	Привлечение инвестиций, государственные субсидии, долгосрочные контракты
5	Природные риски	Катастрофические явления (ураганы, смерчи, землетрясения)	Страхование, разработка планов по управлению чрезвычайными ситуациями
6	Юридические и регуляторные риски	Изменение законодательства, задержки в получении разрешений	Юридическая поддержка, мониторинг законодательных изменений
7	Экономические риски неэффективной работы в энергосистеме	Необеспечение текущих требуемых и заявленных поставок электроэнергии в сеть	Совершенствование краткосрочного прогнозирования выработки и выдачи мощности ВЭС
8	Киберриски	Сбои в работе ВЭС в сети из-за кибератак на системы управления	Повышение мер обеспечения информационной безопасности, инструктаж и обучение им сотрудников

Риски разделены на восемь основных категорий, каждая из которых подробно описана и сопровождается примерами стратегий управления для минимизации или предотвращения негативного влияния этих рисков на проекты в области ветроэнергетики.

Выводы

На основе анализа современного состояния ветроэнергетики в России проведено изучение основных факторов технических и финансовых рисков в ветроэнергетике страны. При активном развитии ветроэнергетики с 2020г. в последние полтора в России на базе проявления политических рисков, санкционного давления, ухода западных компаний выявлено резкое снижение темпов наращивания ветроэнергетических мощностей. Показаны необходимые меры для преодоления данных рисков: развитие отечественного производства узлов ВЭУ, возрождение производства на покинутых иностранных предприятиях. Выделены новые для России виды рисков в ветроэнергетике: риски снижения эффективности при интеграции ВЭС в энергосистемы страны, риски ошибок составления краткосрочных прогнозов выдачи мощность в сеть, риски кибератак. На основании проведенных исследований составлен реестр основных видов рисков в ветроэнергетике на современном этапе, в котором отражены наиболее подверженные различным рискам этапы создания и эксплуатации объектов ветроэнергетики, приведены их характеристики и показаны методы снижения данных рисков.

Работа выполнена в рамках Госзадания № 121051400082-4 и при поддержке Минобрнауки РФ (госзадание № 075-01129-23-00).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 9 июня 2020 г. №1523-р.

2. НП Совет рынка. Перечень квалифицированных энергообъектов, функционирующих на основе ВИЭ. https://www.np-sr.ru/ru/market/vie/index.htm

3. Нефедова Л. В., Соловьев Д. А. Риски развития возобновляемой энергетики в России // Сантехника, отопление, кондиционирование. 2018. № 5. С. 72–75.

4. Конкурсный отбор проектов ВИЭ. Результаты отборов проектов. АТС НП «Совет рынка» https://www.atsenergo.ru/vie

5. Нефедова Л. В., Соловьев А. А. Новые вызовы и риски на пути развития распределенной энергогенерации в Арктическом регионе России // Энергетическая политика. 2018. № 4. С. 99–108.

6. Нефедова Л. В., Соловьев А. А. Финансовые методы управления рисками при использовании ВИЭ // Энергетическая политика. — 2020. № 5 (147). С. 62–75.

7. Официальный сайт Федеральной службы государственной статистики (Росстат), https://rosstat.gov.ru/enterprise_industrial

8. Li Y., Janik P., Schwarz H. Prediction and aggregation of regional PV and wind generation based on neural computation and real measurements // Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2023. Т. 57 https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103314.

9. Ежеквартальный информационный обзор рынка ВИЭ в России II квартал 2023. Москва. АРВЭ. 2023, 16с.

УДК 621. 396. 957 DOI: 10.37816/eeste-2024-1-244-247

О ХАРАКТЕРИСТИКАХ ПОЛИМЕРНЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОЦЕССОВ МЕХАНИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ
ABOUT THE CHARACTERISTICS OF POLYMER DIELECTRICS TO ENSURE ENVIRONMENTAL SAFETY PROCESSES OF MECHANICAL ACTION

Ольга Владимировна Севостьянова, Жанна Юрьевна Кочетова
Olga V. Sevostyanova, Zhanna Yu. Kochetova

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Россия, Воронеж
Military Educational and Scientific Center Air Force «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy», Russia, Voronezh
(e-mail: zk_vva@mail.ru)

Аннотация: В статье представлены результаты определения динамического модуля упругости полимерных материалов, а также продолжительности удара деталей из полимерных материалов в зависимости от их конструкции. Экспериментально установлено снижение шума при соударении деталей, изготовленных из полимеров.

Abstract: The article presents the results of determining the dynamic modulus of elasticity of polymer materials, as well as the duration of impact of parts made of polymer materials, depending on their design. Noise reduction in the collision of parts made of polymers has been experimentally established.

Ключевые слова: экология, ударный шум, снижение шума, полимерные диэлектрики, полиуретаны, эпоксиполиуретаны, капролон.

Keywords: ecology, shock noise, noise reduction, polymer dielectrics, polyurethanes, epoxypolyuretanes, caprolon.

Основные формы механического воздействия – вибрации и удары. Механические воздействия существенно влияют на эксплуатационную надежность аппаратуры связи, машин и оборудования. В настоящее время повышение требований к характеристикам телекоммуникационных и других систем связи машин и оборудования вынуждает улучшать характеристики устройств, входящих в состав этих систем для производственной и экологической безопасности. В случае необходимости решения задач повышения электрических характеристик, следует особое внимание уделить вопросу надежности этих устройств. Известно, что чем выше электрические характеристики, тем труднее их сохранить при различных внешних воздействиях на устройство. Поэтому необходимо добиться высокого уровня их стойкости к химическим, механическим и климатическим воздействиям.

Система мер по защите от ударного шума должна быть заложена уже в источнике его образования на этапе разработки проектно-технической документации, относящейся к проектированию машин, технологических процессов, производственных и жилых зданий, что учитывается при проведении экспертизы проектов, т.е. при проведении предупредительного санитарного надзора.

Методы коллективной защиты по отношению к источнику шума можно разделить на: снижающие уровень шума в источнике его образования и снижающие шум на пути его распространения. Подавление шума в источнике его образования подразделяются на средства снижения механического, аэродинамического и гидродинамического происхождения шума и средства, предупреждающие его распространение звукоизолирующими материалами.

Шум механического происхождения вызывается одиночными или периодическими ударами в сочленения механизмов и в рабочей зоне оборудования, действием механических

усилий, вызывающих упругие деформации деталей механизма и обрабатываемого материала, трением металла о металл, а также инерционными возмущающими силами при движении с переменными ускорениями отдельных элементов оборудования.

Существуют разнообразные методы снижения механического шума ударного происхождения. Рациональное с точки зрения акустики размещение оборудования, звукоизоляция источников механических колебаний, применение специальных глушителей и звукопоглощающих материалов.

Снижения шума механического происхождения непосредственно в источнике его возникновения можно достичь путем целесообразного выбора материалов хорошо гасящих ударные колебания для изготовления отдельных деталей и узлов оборудования и упругих прокладок [1]. Практическое значение для снижения уровня шума механизмов и машин приобретают полимерные материалы с пониженным модулем упругости. Данное направление получает широкое распространение. Демпфирующая способность полимерных материалов определяется совокупностью акустических и физико-механических характеристик, таких как уровни звукового давления, внутреннее трение, ударная вязкость, плотность, модуль Юнга, продолжительность соударения, твердость, коэффициент потерь.

Таким образом, задача экспериментальных исследований сводится к определению динамического модуля упругости полимерных материалов, измерению продолжительности удара деталей из таких материалов в зависимости от толщины детали и формы соударяющихся поверхностей.

Важно установить зависимость между динамическим модулем упругости и твердостью полимерных материалов и в конечном счете их твердостью и продолжительностью удара, что позволит более просто в условиях эксплуатации подбирать полимерные материалы с заданными параметрами, обеспечивающими требуемое снижение ударного шума. Для определения величины снижения ударного шума обычно применяется формула, полученная В.И. Заборовым и Л.П. Тюменцевой [2], которая совпадает по внешнему виду с формулой Л. Кремера:

$$\Delta L = 20 \lg f^2 / f^2_0, \quad (1)$$

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{mC}}, \quad (\text{при } f \geq f_0) \quad (2)$$

$$f_0 = 0{,}465/\tau, \quad (3)$$

f_0 – частота, с которой начинает проявляться влияние местного смятия на величину снижения шума; τ – продолжительность удара.

Если принять m, как массу полимерного материала, отнесенную к единице поверхности $m=\rho d$, то при сравнимых d^2 и S, получим следующее выражение:

$$\Delta L = 20{,}8 \lg f \sqrt{\rho / E_d}\ . \quad (4)$$

где ρ – плотность полимерного материала, кг/м^3.

Из формулы (4) видно, что важное значение для снижения ударного шума при использовании упругого материала, имеет уменьшение динамического модуля упругости.

Для исследования снижения ударного шума были выбраны следующие полимерные материалы, широко выпускаемые промышленностью: полиуретаны марок Л-167, СКУ-7л,СКУ-6, СКУ-10 (ТУ 84-404-73), капролон В-блочный полиамид (МРТУ 6-05-988-66), эпоксиполиуретаны (ЭП) с различным содержанием эпоксидной смолы на 100 весовых частей полиэфира.

Измерения динамического модуля упругости и коэффициента потерь капролона и сравнительно жестких полиуретанов с твердостью более 80 по ГОСТ 263-75 на ТИР-2 проводили стандартными методом на приборе типа 3990. Результаты экспериментальных исследований динамического модуля упругости и коэффициента потерь полимерных материалов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Динамический модуль упругости и коэффициент потерь полимерных материалов.

Полимерный материал	Динамический модуль упругости Е, МПа	Коэффициент потерь η	Твердость по ГОСТ 263-75
Капролон	4000	0,012	-
Л-167	600	0,13	90
СКУ-7Л	50	0,21	80
СКУ-6	7	0,41	50
СКУ-10 (мягкий)	9	0,62	70
СКУ-10 (жесткий)	800	0,39	98

Основные физико-механические характеристики, в том числе полученные экспериментально значения динамического модуля упругости, коэффициента потерь и твердости ЭП, приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Физико-механические свойства эпоксиполиуретанов.

Полимерный материал	Плотность	Динамический модуль упругости, МПа	Коэффициент потерь, η	Твердость	Ударная вязкость, кг/м^3
ЭП-20	100	0,4	82	0,178	$1{,}22\cdot10^3$
ЭП-50	700	0,4	92	0,185	$1{,}3\cdot10^3$
ЭП-100	1500	0,08	96	0,191	$1{,}3\cdot10^3$
ЭП-120	1800	0,09	97	0,20	$1{,}15\cdot10^3$

Из таблиц 1 и 2 следует, что динамические модули упругости у различных марок полиуретанов изменяются в широких пределах (от 7,0 до 1800 МПа), причем полимерный материал с большей твердостью имеет и большее значение динамического модуля упругости. Это обстоятельство позволяет получить определенную зависимость между динамическим модулем упругости полимерного материала и его твердостью.

Исключительная химическая стойкость, высокая теплостойкость, низкий коэффициент трения позволяют использовать фторопласт в конструкциях деталей и узлах трения машин, в том числе в агрессивных средах, а также для борьбы с ударным шумом механического происхождения. Основные физико-механические характеристики фторопласта-4 представлены в таблице 3. Значения динамического модуля упругости, коэффициента потерь, продолжительности удара получены экспериментально.

Таблица 3 – Основные физико-механические характеристики фторопласта-4.

Параметр	Значение
Предел прочности при сжатии, г/см^3	20,0–30,0
Твердость, НЕВ	1,5–2,0
Теплостойкость, °С	280
Водопоглощение, %	0
Модуль упругости, МПа	800
Коэффициент потерь	0,071
Продолжительность удара, с	$5\cdot10^{-4}$

Снижение шума при изготовлении одной или двух соударяющихся деталей из фторопласта и при установке прокладок из него между соударяющимися деталями исследовали на установке, которая была разработана и установлена в акустической

реверберационной камере. Исследования проводили с помощью стандартной ударной машины типа 3204 фирмы «Брюль и Къер», которую устанавливали на стальной плите. При последовательных ударах четырех молотков ударной машины о плиту последняя излучала практически равномерный и сплошной спектр шума. Форма оснований молотков выполнялась плоской и сферической для того чтобы приблизить эксперимент к реальным условиям на производстве, когда возникает шумоизлучение при соударениях обрабатываемого проката с роликами рольганга, имеющих закругленные формы.

Выводы

Получены зависимости между динамическим модулем упругости и продолжительностью удара полимерных материалов (с ростом динамического модуля упругости полимеров уменьшается их продолжительность удара) и, в конечном счете, их твердостью и продолжительностью удара (с ростом твердости понижается значение продолжительности удара), что в условиях производства позволяет более просто подбирать полимерные материалы с заданными параметрами, обеспечивающими требуемое снижение шума на рабочих местах. В качестве оптимального для снижения ударного шума из исследуемых полимерных диэлектрических материалов рекомендуется применять фторопласт-4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мячина О.В. Снижение ударного шума за счет применения полимерных материалов // Новое в экологии и безопасности жизнедеятельности: сб. трудов конференции. СПб, 1997. 180 с.

2. Об учете местного смятия при расчете изоляции ударного шума // Акустический журнал. 1965. Т. 11. № 1. С. 57–61.

УДК 66.067 DOI: 10.37816/eeste-2024-1-247-251

КОМБИНИРОВАННЫЕ И ГИБРИДНЫЕ СИСТЕМНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД
COMBINED AND HYBRID SYSTEMS TECHNOLOGIES FOR INDUSTRIAL WASTEWATER TREATMENT (WWT)

Биляль Саад Таха Таха, Надежда Вячеславовна Алексеева
Bilal S. Taha, Nadezda V. Alekseeva

Тамбовский государственный технический университет, Россия, Тамбов
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(E-mail: bilalsaad_t@yahoo.com, alexejewa.nadja@gmail.com)

Аннотация: Современный подход к очистке сточных вод предполагает использование комбинированных или гибридных систем очистки, сочетающих в себе различные физические, биологические и химические процессы. Основываясь на текущем опыте, становится очевидным, что тщательный и точный выбор системы очистки сточных вод может оказаться более успешным в достижении этих целей, чем полагаться исключительно на отдельные процессы.

Abstract: The modern approach to wastewater engineering involves employing hybrid treatment systems that combine various physical, biological, and chemical processes. Based on current experiences, it is evident that selecting a wastewater treatment system with care and precision can be more successful in achieving these objectives compared to relying solely on standalone processes.

Ключевые слова: сточные воды, адсорбция, мембранная фильтрация, электродиализ, комбинированные процессы, гибридные процессы.

Keywords: Wastewater, Adsorption, Membrane filtration, Electrodialysis, Combined processes, Hybrid processes.

The most fundamental necessities for healthy living are a clean living environment and safe drinking water. The main pollutants in wastewater effluents include halogenated hydrocarbons, heavy metals, dyes, surfactants, organic compounds, salts, soluble bases, etc. The ever-increasing output of wastewater by industries, along with the stringent regulatory rules controlling its disposal, has increased the need for the development of novel technology for treating effluent efficiently and inexpensively. In figure 1 heavy metals, color, chemical oxygen demand (COD), total organic carbon (TOC), biological oxygen demand (BOD), and developing contaminants are removed from wastewater and industrial effluent using physical, chemical, and biological methods [1]. However, these methods may eventually produce a significant quantity of sludge, resulting in secondary pollution. Because of the environmental difficulties caused by water pollution, various researchers have focused their efforts on developing innovative wastewater treatment procedures [2]. The wastewater discharged from different industries is major threat to environment and human health due to the presence of various kind of inorganic and organic toxic material. Conventional physical, chemical, and biological processes used to treat industrial wastewater as a single treat often lead to produce of sludge and other pollutants that cannot be released directly into the environment, necessitating the use of more efficient methods to remove these pollutants in order to preserve the environment and human health. Therefore, the use of combined and hybrid processes for this purpose will be more effective in removing pollutants [3].

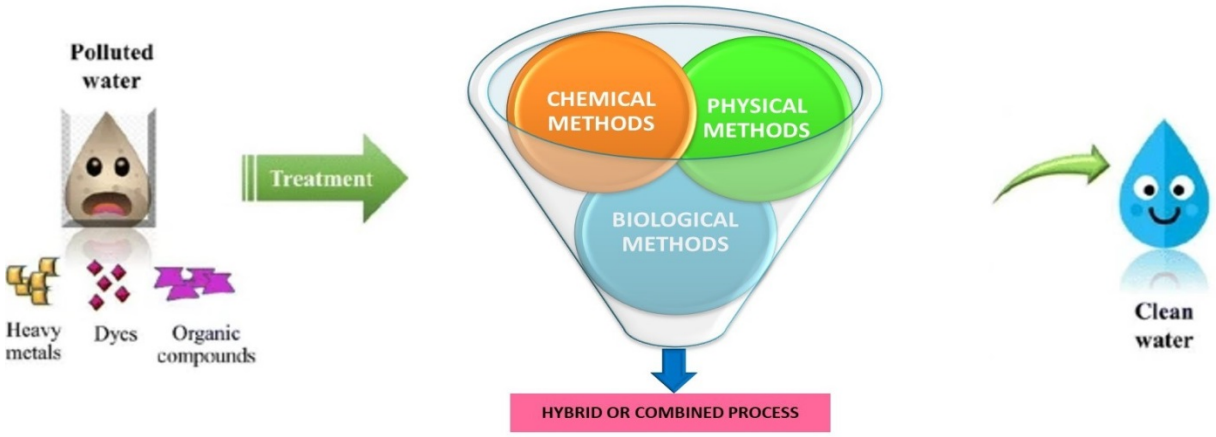


Figure 1 – Overview of industrial wastewater treatment

Hybrid processes and hybrid materials have attracted considerable interest and favor among academics in recent years. It is critical to identify combined and hybrid processes precisely because they are readily confused and misclassified. A combined process is one in which two or more treatment approaches are performed sequentially. A hybrid process is one in which two or more treatment approaches are combined into one. A hybrid process can be classed as a combined process, while a combined process cannot be classified as a hybrid process. The reason for this is because in a combined process, two or more treatment methods are carried out individually. On the other hand, in the hybrid process, the individual treatment criteria are adjusted to integrate the treatments together. Essentially, a hybrid process would be cost-saving and time-saving as it will only require one vessel to carry out the multiple processes that are integrated into one [4].

In Fig. 2, an addition symbol (+) is used between the processes for combined processes to indicate that they are carried out one after the other, but a dash (-) is used between the processes for hybrid processes to indicate that they are integrated and carried out synergistically. The combined processes are carried out in the sequence of treatment techniques specified. For example, if a combined process is specified as chemical + physical combined process, the chemical treatment is

performed first, followed by the physical treatment. This arrangement is specific for the treatment design and is not reversible.

Previous research on hybrid wastewater treatment techniques has proven the practicality and superiority of hybrid systems over stand-alone systems for a variety of effluent or waste water treatment applications [5].

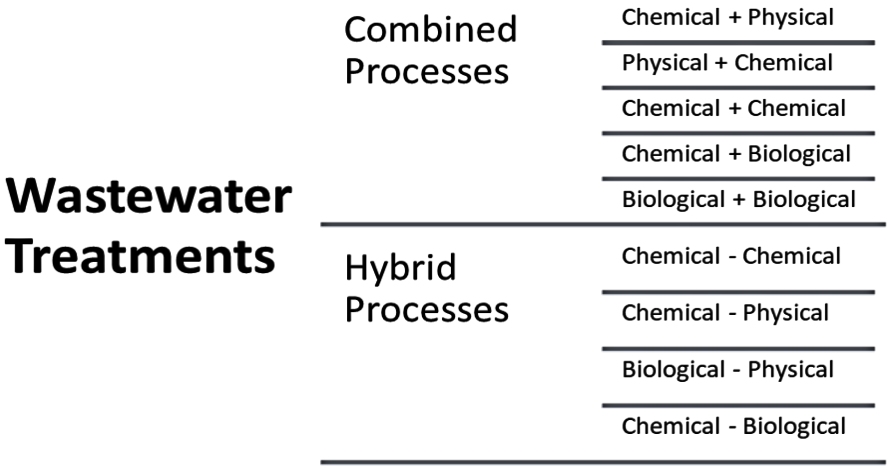


Figure 2 – Proposed of combined and hybrid treatments for industrial wastewater treatment

The majority of the noteworthy benefits are:
(1) Improved total treatment efficiency, and
(2) More consistent and sustainable voltage generation,
(3) Possible energy savings.

These methods will be discussed briefly as shown in Fig. 1, depending on the pairing of processes proposed by researchers. Up until now, various types of combined processes are proven to be effective in industrial wastewater treatment. The combined processes involve combination of chemical, physical and biological processes. Accordingly, the combined processes suggested are Chemical + physical, Physical + chemical, Chemical + chemical, Chemical + biological and Biological + biological. The researchers applied chemical + physical processes for examples, electro-catalytic oxidation and Nano-filtration in the treatment of Acid Red 73 dye were achieved reduction 97.3% of COD , coagulation/flocculation (CF) and Nano-filtration (NF) could achieve 100% colour removal. According to Physical + chemical processes, membrane separation combined with electrolysis processes can give high efficiency of colour removal reached to 93% as well as bentonite adsorption and coagulation was employed for removing colour from synthetic dye wastewater which contained a 99.92% colour removal was achieved. in additional, the examples of chemical + chemical combined processes applied oxidation processes as a popular due to the simplicity of the process, Advanced oxidation processes (AOPs) such as ozonation, Fenton's reaction, sonolysis, electrolysis, and photocatalysis have been widely studied by researchers for the treatment of wastewaters. Chemical + biological combined processes are the most popular combination of treatment technologies wastewaters, cationic polymer (Organo Polymer) combined with a down flow hanging sponge (DHS) system was treated against reactive dye wastewater and achieved colour removal of 90.12% and COD reduction of 66.5%, coagulation/flocculation (CF) and sequencing batch reactor (biological) to remove colour and COD from industrial textile wastewater. They found that 100% colour removal and 50% COD reduction were achieved. Until now the combined processes of Biological + biological have been the most effective treatment for the azo dyes wastewater. Researchers studied the combination of anaerobic biofilter and anoxic-aerobic membrane bioreactor for the treatment of Reactive Orange 16. Theresults were of colour and COD contents from Reactive Orange 16 were completely reduced through the combined process. On the other hand the others applied a combined aerobic system using continuous stirred tank reactor (CSTR) and fixed film

bioreactor (FFB) to treat Indigo dye-containing textile wastewater. This system presented high COD reduction and colour removal efficiencies of 97.5% and 97.3%, respectively [4].

The hybrid processes represented by chemical-chemical, chemical-physical, biological-physical and chemical-biological as proposed by researchers. The hybridisation of chemical processes has been studied quite widely to date. Chemical treatments are suitable for the removal of recalcitrant dyes from wastewaters as most of them are able to degrade dyes. AOPs such as photocatalysis, Fenton's reagent, chemical oxidation, and sonolysis have shown to be effective in the degradation of various hazardous and organic pollutants. These methods require a primary oxidant, which consists of highly reactive radicals, such as the hydroxyl radical (OH•). These highly reactive radicals degrade a wide range of organic pollutants in a short time and are non-selective.Electro-Fenton has proven to be a successful treatment method for the treatment of dye wastewaters, giving high percentage of colour removal (>85%) and COD reduction (85%-90%). The chemical-physical hybrid process usually applied for the system is typically for wastewaters that are rich in suspended solids, oil and grease, turbidity, metals or ions content. Chemical coagulation and flocculation is known as an integration of physical and chemical. Integration of coagulation and flocculation systems with any physical unit operations is able to remove 90% or more of turbidity. Adsorption is a popular method for eliminating pollutants from wastewater. The adsorption-coagulation-dissolved air flotation hybrid may remove a high proportion of oil and grease (91.6 to 94.4%) from the hydrocarbon reservoir; referred to as produced water. Biological-Physical hybrid system can be applied when pollutants consist of high suspended solids, oil and grease, organic and inorganic components. Membrane bioreactor (MBR) is one of the most common biological-physical hybrid systems where it is increasingly applied in wastewater treatment plants. Biological-physical hybrid system can achieve significant energy saving with design such as the upflow anaerobic sludge blanket. (UASB) reactors with submerged aerated biofilters hybrid system UASB has the ability to stabilize anaerobically 70% of the organic substrate that is flowing to the plant. The average overall removal efficiencies of the hybrid system for suspended sold (SS), biological oxygen demand (BOD) and chemical oxygen demand (COD) were 95%, 95% and 88%, respectively. On other hand the chemical-biological hybrid processes used for to eliminate pollutants such as nitrogen, phosphorus, refractory toxic organic which normally reflected as COD level, BOD and total organic carbon (TOC) from the wastewater. that chemical oxidation with sequencing batch reactor (SBR) is able to removal of 76.5% of COD, 45% of TOC and 96% of phenol from petroleum refinery wastewater [6].

Electrodialysis (ED) separation process with the use of activated carbon is a method that can be used for the removal of pigments from wastewater in pigment production plants. The electrodialysis process involves the use of an electric field to separate ions from a solution, while activated carbon is used to adsorb organic compounds and other pollutants. The combination of electrodialysis and activated carbon can result in the removal of a wide range of pollutants from wastewater, including pigments. Accordingly, in my previous study, showed the modernization of a three-stages process for the treatment of wastewater from pigment industrial plants. According to figure 3, the first is an adsorption process using prepared activated carbon, the second is used of membrane filtration and the third an electrodialysis process.

It is proposed to prepare activated carbon from tea residues by adding chemical reagents such as KOH and NaOH. Activated carbon is usually effective in removing pigments. On the other hand, Electrodialysisis mainly used to desalinate saline solutions as well as organic acids. The removal efficiency and adsorption capacity of ED membranes for various solutions were studied [7].

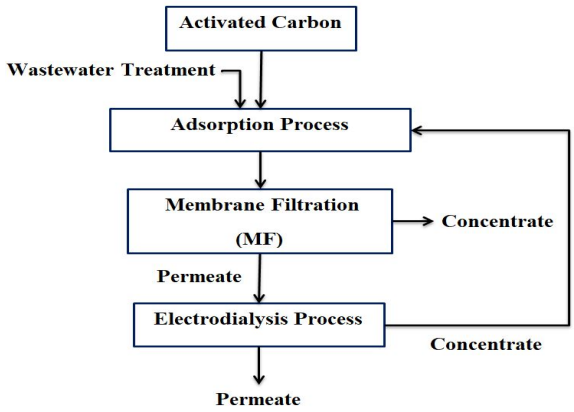


Figure 3 – A combined process of three – stages for wastewater treatment

CONCLUSIONS

Waste water treatment are under important pollutant class and it affects our ecosystem in drastic manner. In the present review, a detailed classification of combined processes and hybrid processes in wastewater treatments together with their advantages, disadvantages and future prospects has been portrayed. The review is divided into two main categories, namely, combined processes and hybrid processes. This is because the wastewater contains biodegradable substrates and inhibitory constituents. Thus, physical, chemical and biological treatments alone may not be sufficient to remove the biodegradable and non-biodegradable substrates. Moreover, the advantages of combined processes can complement each other's strengths and overcome their individual limitations in the single technique. A combined process for removing pigments from wastewater by using activated carbon and electrodialysis has also been mentioned. Water is found to be important and second precious abiotic component in our ecosystem. It is our duty to conserve and to treat the polluted water. In future, there is a hope in the development of sophisticated technologies both in industrial as well as in pilot level with low cost and in high efficiency.

REFERENCES

1. R. Rashid, I. Shafiq, P. Akhter, M. J. Iqbal, and M. Hussain, “A state-of-the-art review on wastewater treatment techniques: the effectiveness of adsorption method,” Environ. Sci. Pollut. Res., vol. 28, no. 8, pp. 9050–9066, 2021, doi: 10.1007/s11356-021-12395-x.

2. S. F. Ahmed et al., “Recent developments in physical, biological, chemical, and hybrid treatment techniques for removing emerging contaminants from wastewater,” J. Hazard. Mater., vol. 416, no. April, p. 125912, 2021, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.125912.

3. S. Garg, Z. Z. Chowdhury, A. N. M. Faisal, N. P. Rumjit, and P. Thomas, “Impact of Industrial Wastewater on Environment and Human Health,” Environ. Sci. Eng., pp. 197–209, 2022, doi: 10.1007/978-3-030-83811-9_10.

4. C. X. H. Su, L. W. Low, T. T. Teng, and Y. S. Wong, “Combination and hybridisation of treatments in dye wastewater treatment: A review,” J. Environ. Chem. Eng., vol. 4, no. 3, pp. 3618–3631, 2016, doi: 10.1016/j.jece.2016.07.026.

5. H. M. Solayman et al., “Performance evaluation of dye wastewater treatment technologies: A review,” J. Environ. Chem. Eng., vol. 11, no. 3, p. 109610, 2023, doi: 10.1016/j.jece.2023.109610.

6. P. F. Tee et al., “Review on hybrid energy systems for wastewater treatment and bio-energy production,” Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 54, pp. 235–246, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.10.011.

7. Д. М. К. ДжубариМохаммед К. and Т. Б. С. ТахаБилалС., “Wastewater treatment of pigment production plants in two stages: prepared activated carbon and electrodialysis process,” Ползуновскийвестник, no. 2, pp. 155–159, 2023, doi: 10.25712/astu.2072-8921.2023.02.020.

УДК 614. 849 DOI: 10.37816/eeste-2024-1-252-256

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ ПОДХОД К ОРГАНИЗАЦИИ ПРОВЕРКИ КАЧЕСТВА ОГНЕЗАЩИТНОЙ ОБРАБОТКИ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ
PROBABILISTIC APPROACH TO THE ORGANIZATION OF QUALITY CONTROL OF FIRE-RESISTANT TREATMENT OF WOODEN STRUCTURES

Сергей Викторович Федосов*,, Александр Александрович Лазарев***, Дмитрий Евгеньевич Цветков***, Андрей Юрьевич Комлёв***
Sergey V. Fedosov*,, Alexander A. Lazarev***, Dmitry E. Tsvetkov***, Andrey Y. Komlev*****

** Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, Москва*
**National Research Moscow State University of Civil Engineering, Russia, Moscow*
*** Поволжский государственный технологический университет, Россия, Йошкар-Ола*
***Volga State University of Technology, Russia, Yoshkar-Ola*
(e-mail: FedosovSV@mgsu.ru)
****Ивановская пожарно – спасательная академия ГПС МЧС России, Россия, Иваново*
****Ivanovo Fire and Rescue Academy of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Russia, Ivanovo*
(e-mail: kgn@edufire37.ru)

Аннотация: Рассмотрена методика оценки качества огнезащитной обработки деревянных строительных конструкций на основе вероятностного подхода. Определена вероятность нахождения описанной системы в различных состояниях при оценке качества огнезащитной обработки деревянных конструкций.

Abstract: The method of assessing the quality of fire-retardant treatment of wooden building structures based on a probabilistic approach is considered. The probability of finding the described system in various states when assessing the quality of fire-retardant treatment of wooden structures is determined.

Ключевые слова: огнезащитная обработка, технологические процессы, контроль качества, вероятность состояния, деревянные строительные конструкции, пожарная безопасность.

Keywords: flame retardant treatment, technological processes, quality control, condition probability, wooden building structures, fire safety.

Известной проблемой в понимании пожарной опасности деревянных зданий в целом, а также отдельных конструкций зданий, выполненных из древесины, является низкий предел огнестойкости.

Современные технологические приемы снижение (понижения) горючести деревянных конструкций, изделий разнообразны, необходимый результат достигается применением следующих способов:

- огнезащитные обмазки, оштукатуривание;
- огнезащитный лакокрасочные изделия;
- теплоизолирующие (термоизолирующие) конструкции;
- огнезащитные пропитки (антипирены).



Рисунок 1 — Способы огнезащиты древесины [1-4]

Технологические процессы огнезащитной обработки древесины представлены на рис. 1. Они рассматривались в ряде работ Мирошниченко С.Н., Коган Л.И., Кондратьева И.Б., Димова Н.В., где описаны составы для огнезащитной обработки древесных материалов [1], Стенина Е.И., Чеснокова Т.Ю., изучали огнезащитную обработку лущеного шпона с целью получения фанеры высокой огнестойкости [2], Горборуков А.А. исследовал виды огнезащитных материалов в строительстве и повышение огнезащитных свойств строительных конструкций [3], а также иные [4].

Помимо технологий нанесения различных защитных составов на поверхность древесины и в объём древесины ГОСТом [5] установлены общие требования к огнезащитным составам и веществам для древесины, а также методам их испытаний. Проверка качества огнезащитной обработки древесины подразумевает отбор срезов деревянных конструкций для проведения огневых испытаний в условиях лаборатории. Отобранные образцы подвергаются огневым испытаниям и в зависимости от потери их массы устанавливается группа огнезащитной эффективности. При потере массы не более 9 % устанавливают I группу огнезащитной эффективности, при потере массы 9%, но не более 25%, устанавливают II группу огнезащитной эффективности, при потере массы более 25% считается, что нанесенный состав на образец древесины не обеспечивает огнезащиту древесины.

Однако описанные выше технологические процессы (решения) по снижению (понижению) горючести деревянных конструкций, изделий не рассматривают случайные процессы при выборе места для отбора проб для оценки качества огнезащитной обработки, а также не реализуется расчет предельных вероятностей. В связи с чем целесообразно рассмотреть процесс контроля качества огнезащитной обработки деревянных конструкций, изделий на основе теории цепей Маркова с последующим определением предельных вероятностей. Актуальность разработки методики оценки качества огнезащитной обработки деревянных строительных конструкций на основе вероятностного подхода продиктована необходимостью определения места отбора проб для последующего исследования. ГОСТом [5] определено, что в целях контроля качества огнезащитной обработки необходимо произвести отбор образцов (срезы с деревянных конструкций) с различных типов конструкций, а также в местах, качество обработки которых вызывает сомнение. Следовательно, имеет место быть случайный процесс отбора проб, в связи с чем, предположим, что в некоторой системе четырех состояний F осуществляется контроль качества огнезащитной обработки деревянных конструкций. В этом случае имеет место марковский случайный процесс с дискретными состояниями S_1, S_2, S_3, S_4. При этом переходы системы из состояния в состояние происходят в случайных моментах времени. Данные

переходы возникают при воздействии пуассоновского потока событий с интенсивностью U_{ij} = const. Пример размеченного графа состояний системы F представлен на рис. 2.

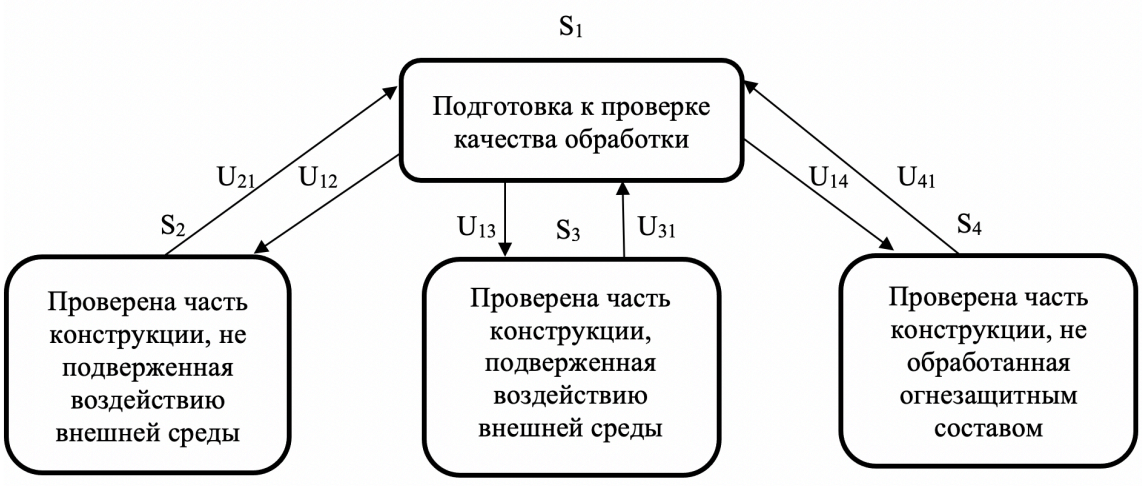


Рисунок 2 — Размеченный граф состояний системы F

На рис. 2 состояние S_1 соответствует подготовки проверки качества обработки. Состояние S_2 соответствует части обработанной конструкции, не подверженной воздействию внешней среды. При состоянии S_3 обработанная конструкция, подвержена воздействию внешней среды. При состоянии S_4 проверяемая часть конструкции не обработана огнезащитным составом. Древесина в состояниях системы S_1-S_3 подвергалась огнезащитной обработке.

Для нахождения вероятностей состояний составляется система уравнений [6, 7]:

$$\sum_{i=1}^{n} P_i U_{ij} = \sum_{i=1}^{n} P_i U_{ij}, (j = 1,2, \dots, n) \quad (1)$$

где U_{ij} – интенсивность переходных потоков;

P_i – вероятность состояния. Данная система составляется по следующим правилам:

– число уравнений в системе F равно числу состояний, в нашем случае это четыре состояния деревянной конструкции;

– каждое состояние S (1-4) соответствует уравнению в системе уравнений (2);

– в левой части каждого уравнения находится сумма интенсивностей U_{ij} (стоят над стрелками на рис. 2 и рис.3) для всех стрелок, входящих в состояние S_j, умноженных на вероятности состояний, из которых выходят стрелки, величина интенсивности определяется эмпирическим путем по итогам наблюдения в течение 5 лет на объектах, эксплуатируемых со сходными деревянными конструкциями;

– в правой части уравнений находится сумма интенсивностей, выходящих из S_j стрелок, данная сумма умножается на вероятность P_j.

На рисунке 2 изображается размеченный граф системы отбора проб огнезащищенной древесины для контроля её качества с заданными значениями интенсивности потока событий. Рассмотрим систему F_1 на рис. 3.

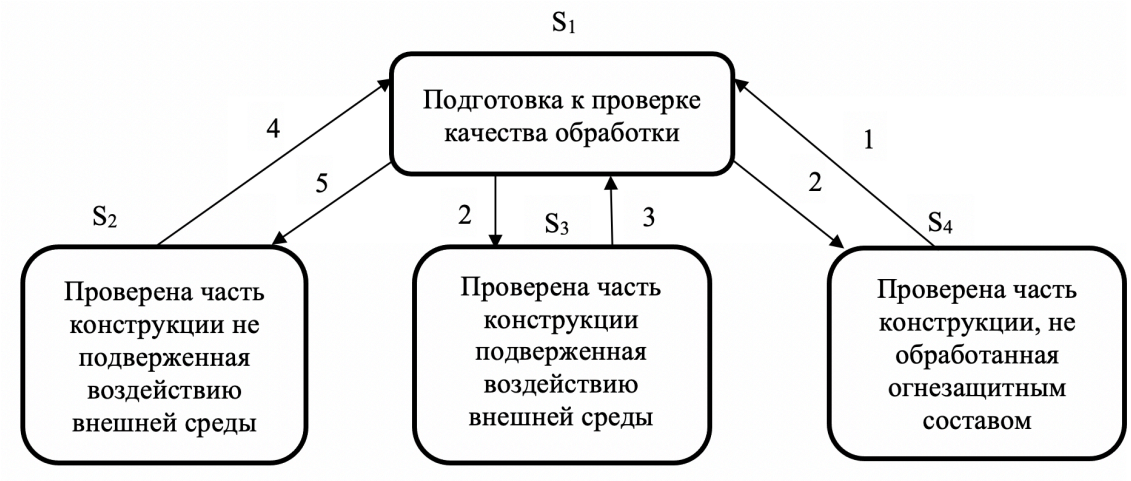


Рисунок 3 — Размеченный граф состояний системы F_1

На основе рис. 3 получается то, что система дифференциальных уравнений для системы F_1 будет иметь вид:

$$\begin{cases} P_1' = 4\,P_1 - 5\,P_2 + 3P_3 - 2P_1 - 2P_1 + P_4, \\ P_2' = -4\,P_1 + 5\,P_2, \\ P_3' = 2\,P_1 - 3\,P_3, \\ P_4' = 2\,P_1 - P_4 \end{cases} \quad (2)$$

Система уравнений (2) составлена на основании размеченного графа состояний системы на рис.3 с учетом правила составления уравнений Колмогорова. Здесь в левой части каждого из уравнений находится производная вероятности состояния S_i, то есть P_i'. В правой части уравнений представлена сумма произведений вероятностей $P_i(\tau)$ всех состояний на интенсивности соответствующих потоков, с учетом направления этих потоков. В момент времени τ система F_1 будет находиться в определенном состоянии S_i.

Для описания стационарного режима системы F_1 представляется система алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} -4\,P_1 + 5\,P_2 = 0, \\ -5\,P_2 + 3\,P_3 + P_4 = 0, \\ 2\,P_1 - 3\,P_3 = 0, \\ 2\,P_1 - P_4 = 0, \\ P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 1 \end{cases} \quad (3)$$

По итогам решения методом Гаусса указанной системы получены предельные вероятности для системы F_1. Они будут равны: $P_1 = 0{,}224$; $P_2 = 0{,}179$; $P_3 = 0{,}149$; $P_4 = 0{,}448$.

Результаты расчета показывают, что наибольшее среднее значение предельных вероятностей для системы F_1 - P_4. В состоянии S_4.данная система будет находиться в среднем 44,8%, то есть в ходе выполнения контрольных срезов чаще всего будет проверена часть конструкции, не обработанная огнезащитным составом. Результаты расчета могут быть использованы для принятия управленческих решений в целях определения количества персонала для контроля качества огнезащитной обработки, планирования работ по восстановлению утраченных огнезащитных свойств деревянных конструкций, а также прогнозирования возможных расходов на уплату штрафных санкций и судебные издержки. Вероятностный подход позволяет рассчитать количество работников, привлекаемых для проведения работ по проверке качества огнезащитной обработки, устранения выявленных недостатков, а также время и средства, необходимые для данной деятельности. При этом работы могут проводиться как силами персонала предприятия, так и при аутсорсинге. Использование данных расчетов также позволяет прогнозировать затраты на уплату штрафов в случае отсутствия вышеуказанных действий по устранению нарушений. Эти затраты могут одновременно сопровождаться судебными издержками на привлечение защитника

(представителя) для подготовки документов для обоснования позиции и представления интересов организации в суде. Значение 44,8% для состояния S_4 является достаточно высоким (значительно более 15%), что говорит о появлении необходимости дополнительных затрат с высокой долей вероятности. Напротив, вероятность нахождения системы в состоянии S_3 является умеренной (в диапазоне 5…15%). Используемый подход может быть применен для составления размеченного графа состояний других систем.

Выводы

Проведен расчет для различной интенсивности потока событий для 4 состояний, при которых осуществляется отбор проб огнезащищенной древесины для контроля её качества.

Определены предельные вероятности для системы F_1. В среднем 22,4% указанная система будет находиться в состоянии S_1, 17,9% - в состоянии S_2, 14,9% - в состоянии S_3, 44,8% - в состоянии S_4.

При организации контроля огнезащиты деревянных строительных конструкций необходимо учесть:

- зависимости предельных вероятностей для систем отбор проб огнезащищенной древесины для контроля её качества в зданиях, сооружениях, строениях;
- совершенствование подходов к организации и проведению проверки качества огнезащитной обработки при определении места соответствующего отбора проб.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. SU 905081 A1, СССР, Состав для огнезащитной обработки древесных материалов // С.Н. Мирошниченко, Л.И. Коган, И.Б. Кондратьева, Н.В. Димова; опубл. 15.02.1982, бюл. № 6.

2. Стенина Е.И., Чеснокова Т.Ю. Огнезащитная обработка лущеного шпона // Труды Белорусского государственного технологического университета. Серия 2. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. 2014. № 2 (166). С. 242-245.

3. Горборуков А.А. Виды огнезащитных материалов в строительстве и повышение огнезащитных свойств строительных конструкций // Сборник трудов XIII Всероссийской научно-практической конференции для студентов и учащейся молодежи «Прогрессивные технологии и экономика в машиностроении». 2022. С. 76-78.

4. Федосов С.В., Лазарев А.А., Цветков Д.Е. Технологические процессы огнезащитной обработки древесины. Сборник Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы лесного хозяйства и деревопереработки». 2023. С. 155-158.

5. ГОСТ Р 53292-2009 «Огнезащитные составы и вещества для древесины и материалов на ее основе. Общие требования. Методы испытаний».

6. Дынкин Е.Б., Юшкевич А.А. Теоремы и задачи о процессах Маркова. Москва: Наука, 1967. - 231 с.

7. Гренандер У. Краткий курс вычислительной вероятности и статистики. Москва: Наука, 1978. - 191 с.

УДК 624.144.8 DOI: 10.37816/eeste-2024-1-257-260

АНАЛИЗ МЕТОДОВ БОРЬБЫ СО СНЕЖНО-ЛЕДЯНЫМИ ОТЛОЖЕНИЯМИ НА ДОРОГАХ ГОРОДА НОВОСИБИРСКА
ANALYSIS OF METHODS OF COMBATING SNOW AND ICE DEPOSITS ON THE ROADS OF NOVOSIBIRSK

Виктория Анатольевна Харина, Ирина Николаевна Россало
Viktoriya A. Kharina, Irina N. Rossalo

Новосибирский технологический институт (филиал) «Российского государственного университета имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)»,
Россия, Новосибирск
Novosibirsk Institute of Technology (branch) "The Kosygin State University of Russia",
Russia, Novosibirsk
(email: heineken15@yandex.ru)

Аннотация: Проведен анализ технической документации по обеспечению содержания транспортно-пешеходных улиц, пешеходных дорожек и тротуаров в надлежащем состоянии в зимний период. Изучены методы борьбы со снежно-ледяными отложениями и выделены основные противогололедные материалы, используемые для обработки зимних дорог в Новосибирске, а также отмечены основные проблемы, не позволяющие обеспечивать удовлетворительное состояние дорог в городе.

Abstract: The analysis of technical documentation on ensuring the maintenance of transport and pedestrian streets, pedestrian paths and sidewalks in proper condition in winter is carried out. Methods of combating snow and ice deposits have been studied and the main anti-icing materials used for processing winter roads in Novosibirsk have been identified, as well as the main problems that do not allow ensuring a satisfactory condition of roads in the city have been noted.

Ключевые слова: снежно-ледяные отложения, тротуары, противогололедные материалы.

Keywords: snow and ice deposits, sidewalks, deicing materials.

По данным Министерства транспорта РФ, в Новосибирске зимний период в среднем длится 178 дней, из них в течение 98 дней [1] на автомобильных дорогах, транспортно-пешеходных улицах и тротуарах возможны образования снежно-ледяных отложений в виде льда, снежного наката или рыхлого снега. Подобные отложения не только затрудняют передвижение пешеходов, но и способствуют получению травм различного характера. Наиболее опасной является обледенелая поверхность, прикрытая рыхлым снегом, что создает мнимое чувство безопасности у пешеходов. Наступая на такой участок, пешеход не успевает скоординировать свои движения, так как не видит льда под слоем снега, и способен получить серьезные травмы. Для снижения риска проскальзывания следует носить обувь с антискользящими приспособлениями [2], а также соблюдать правила передвижения по обледенелым поверхностям: двигаться не спеша, “шаркающей” походкой на полусогнутых ногах. В свою очередь, эффективным методом борьбы со снежно-ледяными отложениями на дорогах является своевременная их расчистка снегоуборочной техникой или обработка различными противогололедными материалами (ПГМ). Так, в Новосибирске на поддержание дорог в надлежащем состоянии в зимний период дорожно-коммунальные службы расходуют ПГМ около 2,2т на 1000 м^2 дорог в год [1]. Проведем анализ методов борьбы со снежно-ледяными отложениями на дорогах г. Новосибирска.

Состояние дорог и тротуаров в целом должно соответствовать требованиям ГОСТ Р 50597-2017, согласно которому образования рыхлого и талого снега или скользкости на транспортно-пешеходных улицах, пешеходных дорожках и тротуарах необходимо убирать в

течение от одного часа до одних суток в зависимости от толщины наслоения, категории дороги и интенсивности движения пешеходов. Например, при интенсивности движения пешеходов более 250 чел/ч., рыхлый и талый снег с данного участка необходимо убрать в течение одного часа, зимнюю скользкость — в течение 12 часов, а при интенсивности движения менее 100 чел/ч. - в течение 3 и 24 часов соответственно [3].

Для выполнения требований указанного стандарта разработаны различные мероприятия по содержанию пешеходно-транспортных улиц и тротуаров в надлежащем состоянии: предварительная обработка дорожных поверхностей противогололедными материалами за 1-2 часа до образования снежных заносов и наледи; механизированная уборка образовавшихся снежных заносов, а также плавление снежно-ледяных отложений химическими реагентами с обязательной последующей уборкой; создание искусственной шероховатости при помощи фрикционных материалов с размерами фракций не более 5мм. Все перечисленные мероприятия подразумевают применение ПГМ, которые по виду разделяются на противогололедные реагенты (двухфазные, жидкие и твердые), фрикционные и комбинированные материалы. ПГМ могут применяться в твердом или жидком состоянии в зависимости от типа дорожного полотна, погодных условий и вида снежно-ледяных отложений, что также прописано в технической документации [4]. Очевидно, что использование химических реагентов на данный момент является наиболее эффективным способом борьбы со снежно-ледяными отложениями, так как способны полностью очищать дорожное полотно в соответствии требованиями стандартов за счет содержания в их составе соли хлорида натрия и хлорида кальция, способствующих снижению температуры замерзания воды. Отметим, что на дворовых (придомовых) территориях, в парковых и пешеходных зонах, остановочных комплексах, парковках, территориях социально-медицинского назначения, площадках должны применяться специально разработанные противогололедные материалы 3 или 4 класса опасности по ГОСТ 12.1.007 [5] и соответствующие требованиям ГОСТ Р 58427-2020 [4]. ПГМ не должны обладать выраженной аллергической активностью и кожно-резорбтивным воздействием.

В Новосибирске для таяния снега и устранения скользкости на транспортно-пешеходных улицах, пешеходных дорожках и тротуарах дорожно-эксплуатационные управления в качестве ПГМ применяют смесь из отсева дробления горных пород (90%) и концентрата минерального — галита (техническая соль - 10%), универсальный «Бионорд» и двухфазный реагент — смесь жидкого «Бионорда» с твердыми компонентами [6]. Приведем краткую характеристику представленных ПГМ.

Смесь из отсева дробления горных пород с концентратом технической соли (галит) позволяет дешево и эффективно бороться с наледью на дорогах и тротуарах. Входящая в смесь техническая соль относится к 3 классу опасности (умеренноопасное вещество) и на 97% состоит из хлористого натрия, остальными компонентами в которой являются калий-ион, магний-ион, сульфат-ион, кальций-ион. Техническая соль способна растворять лед при температуре воздуха до -20^0С. При этом, оптимальной температурой применения данной соли считается -10^0С. Галит является природным минералом, и при правильном использовании не оказывает негативное влияние на окружающую среду. Однако, если не контролировать расход галита и своевременную его уборку с улиц города, то это может привести к засолению почвы, а также снижению срока службы обуви пешеходов и металлических частей автотранспорта. Применение отсева дробления горных пород в смеси с галитом способствует усилению фрикционного сцепления обуви с дорогой, а также снижению пылеобразования по сравнению с речным песком. Речной песок применяется в качестве ПГМ для посыпки тротуаров в местах с небольшой интенсивностью движения пешеходов, в его состав входит значительное количество ила, что способствует сильному загрязнению улиц города и воздуха, особенно, с наступлением весны.

“Бионорд” в различных модификациях производится на Уральском заводе противогололедных материалов в соответствии с СТО 001-80119761-2010 [7] и широко применяется во многих городах России. Данный ПГМ относится к 4 классу опасности

(малоопасное химическое вещество), считается эффективным для борьбы со снежно-ледяными отложениями и безопасным для экологии, транспорта и здоровья человека. “Бионорд-универсальный” представляет собой кристаллы белого, серого и коричневого цвета размером не более 10 мм, пригоден для использования на дорогах с твёрдым покрытием любого типа, показывает свою плавящую эффективность при температуре воздуха до -30^{0}С, не забивает ливневую канализацию и растворяется без остатка. По химическому составу “Бионорд-универсальный” состоит из хлорида кальция (10-30%), хлорида натрия (45-89%), хлорида калия (не более 10%), карбамида (не более 10%), формиата натрия (не более 15%), формиата калия (не более 15%), также может содержать хлорид магния (не более 25%). Содержание карбамида и формиата натрия снижают коррозионное действие хлорида кальция и хлорида натрия на металлические детали. В результате физико-химического взаимодействия реагентов со снежно-ледяными отложениями, образуется водно-солевой раствор с более низкой температурой замерзания, чем у воды. При этом, высокое содержание хлористого кальция не позволяет раствору замерзнуть даже при температуре -50^{0}С, в отличие от хлористого натрия, который перестает эффективно действовать при температуре -20-25^{0}С [7].

“Бионорд- жидкий” по химическому составу состоит из растворимых солей (20-50%), хлорида кальция (не более 30%), хлорида натрия (не более 23%), хлорида калия (не более 5%), карбамида (не более 5%), хлорида магния (не более 10%). Представляет собой прозрачный водный раствор без механических включений, осадка, взвеси и без запаха [7]. Сочетание твердых фракций “Бионорда” с его жидкой формой позволяет увеличить эффективность плавления снега и льда на дорогах в более короткие сроки, обеспечить равномерное распределение реагента, а также сократить его расход (30-100г/м^2 в зависимости от температуры окружающей среды) по отношению к песко-соляной смеси (150-180 г/м^2) [8].

Таким образом, правила и методы поддержания дорог, пешеходных зон, придомовых территорий и т.д. в надлежащем состоянии, подробно и четко прописаны в нормативной документации, а для обеспечения наилучшего качества обработки разработан и утвержден большой ассортимент противогололедных материалов. Не смотря на это, остаются проблемы, не позволяющие обеспечивать удовлетворительное состояние дорожного полотна в городе. Во-первых, не контролируется дозированное распределение ПГМ, в частности таких, как двухкомпонентный “Бионорд”, который требует модернизированного оснащения специальной техники, позволяющей распределять ПГМ в объемах, в 2 раза меньших по сравнению с песко-соляной смесью. В противном случае, перенасыщение дорог ПГМ ведет к образованию луж и загрязнению обуви, верхней одежды и автотранспорта. Во-вторых, в соответствии с требованиями стандарта [7], после обработки дорог противогололедными реагентами, через определенный промежуток времени образовавшуюся растопленную снежную массу необходимо убирать с дорог, что также не в полной мере контролируется дорожно-эксплуатационными управлениями. Несвоевременная уборка ПГМ с улиц приводит к значительному загрязнению города в целом. В-третьих, содержащиеся в любых ПГМ соли хлорида натрия и хлорида кальция, не смотря на введение в состав смягчающих добавок, приводят к возникновению коррозии кузова автотранспорта, а также к порче верхней одежды и обуви, особенно, если своевременно не очищать их поверхность от попадания солей реагентов. При этом, ГОСТ 58426-2020 допускает незначительность воздействия ПГМ на кожу обуви [9]. В-четвертых, не контролируется своевременная обработка и очистка дворовых (придомовых) территорий и пешеходных зон от обледенения. Так, по наблюдения авторов настоящей статьи, после понижения температуры и установления обледенения на дорожном полотне в начале ноября 2023 года, большинство дворовых (придомовых) территорий и пешеходных зон несколько дней не подвергались обработке ПГМ.

Данная статья имеет обзорно-аналитический характер и направлена на обоснование принятия мер по повышению качества борьбы со снежно-ледяными отложениями в Новосибирске.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ОДМ “Руководство по борьбе с зимней скользкостью на автомобильных дорогах”. Утвержден распоряжением Минтранса России № ОС-548-р от 16.06.2003 / Москва, 2003.

2. Быкова, А.Б. Классификация противоскользящих устройств и приспособлений для обуви // А.Б. Быкова, П.С. Карабанов // Концепция, теория, методики фундаментальных и прикладных научных исследований в области инклюзивного дизайна и технологий: сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции (25-27 марта 2020г.). Часть 1. –Москва: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2020, С.125-128.

3. ГОСТ Р 50597-2017 Дороги автомобильные и улицы. Требования к эксплуатационному состоянию, допустимому по условиям обеспечения безопасности дорожного движения. Методы контроля. Введен в действие 01.09.2018 / Москва: Стандартинформ, 2017, 28с.

4. ГОСТ Р 58427-2020 Материалы противогололедные для применения на территории населенных пунктов. Общие технические условия. Введен в действие 01.12.2020 / Москва: Стандартинформ, 2020, 19с.

5. ГОСТ 12.1.007-76 Система стандартов безопасности труда. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности. Введен в действие 01.01.1977 / Москва: Стандартинформ, 2007, 7с.

6. Департамент транспорта и дорожно-благоустроительного комплекса мэрии г. Новосибирска. Официальный сайт - https://novo-sibirsk.ru/dep/transport/.

7. СТО 001-80119761-2010 Противогололедные материалы «Бионорд». Технические условия. Введен в действие приказом по предприятию “УЗПМ” № 7 от 04.05. 2016г / Пермь, 2016, 29с.

8. Инструкция по использованию противогололедных материалов «БИОНОРД» (СТО 001-80119761-2010) / Пермь, 2014, 6с.

9. ГОСТ 58426-2020 Дороги автомобильные общего пользования. Материалы противогололедные. Методы испытаний. Введен в действие 01.12.2020 / Москва: Стандартинформ, 2020, 54 с.

УДК 662.62 DOI: 10.37816/eeste-2024-1-261-263

ВЫБОР ПРИОРИТЕТНЫХ ВИДОВ ТОПЛИВА ДЛЯ КОТЕЛЬНЫХ МУНИЦИПАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ
SELECTION OF PRIORITY TYPES OF FUELS FOR BOILER BOILERS OF MUNICIPAL ENTITIES

Ирина Валерьевна Костюченко, Андрей Владимирович Старых, Ольга Геннадьевна Любская
Irina V. Kostyuchenko, Andrey V. Starykh, Olga G. Lyubskaya

Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), Россия, Москва
The Kosygin State University of Russia, Russia, Moscow
(e-mail: kostirina@mail.ru, 191831@stud.rguk.ru, lyubskaya-og@rguk.ru)

Аннотация. Рассмотрены вопросы видов топлива, применяемые в работе котельных установок системы жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ). Определены приоритетные виды топлива в зависимости от местных условий добычи тепловых ресурсов. Показаны возможности создания устойчивой работы котельных установок при возникновении чрезвычайных ситуаций.

Abstract. The issues of fuel types used in the operation of boiler installations of the housing and communal services system (HCS) are considered. Priority types of fuel have been identified depending on local conditions for the extraction of thermal resources. The possibilities of creating stable operation of boiler plants in the event of emergency situations are shown.

Ключевые слова: муниципальное поселение, тепловые системы, топливо, возобновляемые и невозобновляемые источники энергии.

Keywords: municipal settlement, thermal systems, fuel, renewable and non-renewable energy sources.

Защите окружающей среде в последнее десятилетие в Российской Федерации уделяется пристальное внимание. Это связано с актуальностью вопросов загрязнения воздушного бассейна больших городов и мегаполисов выбросами от различных источников, включая котельные установки в жилищно-коммунальных хозяйствах (ЖКХ).

В настоящее время наблюдается тенденция строительства малых микрорайонов, имеющих собственные котельных для отопления объектов жилищного и социального назначения. Как правило, такое строительство осуществляется за счет средств инвесторов, что стимулирует поиск новых видов топливных ресурсов взаимен привычных – нефти и нефтепродуктов. В уже сложившихся инфраструктурных агломерациях также актуальным является перевод объектов теплоснабжения на иные виды топливных ресурсов.

Основные государственные документы, регламентирующие данный вид деятельности [1, 2] содержат четко сформулированные критерии, позволяющие организовать систему теплоснабжения от источников индивидуального теплоснабжения потребителей тепловой энергии в зависимости от численности населения городского поселения (до10 тыс. человек, либо свыше100 тыс. человек).

К приоритетным видам топлива относятся как возобновляемые, так и невозобновляемые источники энергии, преобладающие в поселении, городском округе либо городе федерального значения. По стратегическим планам в области энергетики в РФ к 2025 году доля не углеродной энергетики составит около 5% (рис.1) [4].

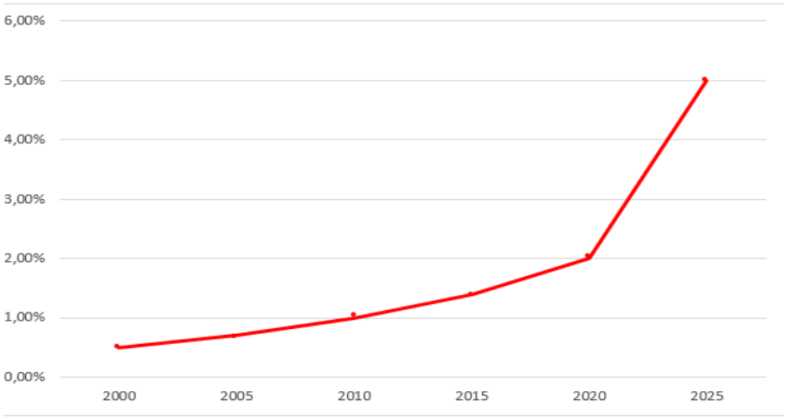


Рисунок 1 — Прогноз на возобновляемые источники энергии в производстве тепловой энергии

Это виды топлива, позволяющие в долгосрочной перспективе выйти на повышение экономической, технологической эффективности системы теплоснабжения с учетом соблюдения требований энергетической и экологической безопасности при сокращении субсидий как со стороны государственного бюджета, так и со стороны инвесторов - энергия солнца, энергия ветра, энергия вод (в том числе энергия сточных вод).

При этом возможно использовать местные виды топлива, то есть те топливные ресурсы, которые добываются либо производятся в местах их образования, либо добычи. К таким продуктам относят, в частности, торф и продукты его переработки, попутный газ, отходы деревообработки [3], часто в виде брикетов, отходы сельскохозяйственной деятельности, отходы производства и потребления, в том числе твердые коммунальные отходы (ТКО), и иные виды топливных ресурсов.

В тех случаях, когда топливом является уголь, его вид, доля и значение низшей теплоты сгорания, определяется [5] для производства тепловой энергии по каждой системе теплоснабжения.

При принятии решений о переводе на другие, приоритетные виды топлива возможно столкновение с различными угрозами энергетической и экологической безопасности. В данной статье мы не ставим себе целью подробно останавливаться на угрозах безопасности, а рассмотрим условия, при которых эти ситуации становятся невозможными.

Важной составляющей энергетической безопасности являются требования к безопасности ресурсной базы. Главным, определяющим фактором стабильной работы топливной системы, является возможность добывать и транспортировать местные виды топлива к месту потребления. Для этого важна достоверная и достаточно детальная оценка объема ресурсов, размер и качественные характеристики в будущем.

Расчет прогнозных значений должен включать риски возникновения ЧС природного и техногенного характера; интенсивность добычи полезного ископаемого и объема его запасов на выбранной территории; текущая и прогнозная стоимость энергоресурсов и динамика факторов, способных влиять на изменение его цены.

Обеспечение экологической безопасности осуществляется на различных этапах функционирования объекта инфраструктуры. На *этапе проектирования и строительства* сооружения основными факторами выступают:

установка высокоэффективных средств очистки выбросов и сбросов загрязняющих веществ от работающего теплового оборудования;

использование экологически безопасных видов топлива;

забота об отходах производства.

На *этапе ввода* сооружения в эксплуатацию необходимо претворять в жизнь в полном запланированном проектной документацией объеме мероприятий по охране окружающей среды, а также оснащение каждого объекта строительства техническими средствами и

технологиями устранения негативных последствий своей деятельности для окружающей среды.

В *ходе самой эксплуатации* главным является соблюдение регламентированных технологий и требований в отношении природной среды и ее рационального использования и обеспечение соблюдения всех утвержденных нормативов качества окружающей среды, позволяющих сохранять здоровье людей и восстановление природных ресурсов.

Перевооружение котельных возможно лишь при соответствии всем требованиям нормативно-правовых актов в области защиты населения от чрезвычайных ситуаций [6] и санитарно-эпидемиологического регулирования, а также в определенной степени при удовлетворении спроса потребителей на тепловую энергию. Для этой цели характеристики мощностей всей цепочки ресурсной базы, участвующей в передаче энергии, а именно: теплоносителя, котельных и трубопроводных сетей, должны в полной мере отвечать собственным и хозяйственным нуждам потребностям подключенных к ним потребителей.

Необходимо также учитывать местные условия эксплуатации тепловых сетей, стабильность ресурсов базы основного вида топлива, применяемых для получения тепла и категории котельных. Для обеспечения указанных параметров следует закладывать возможность работы котельных на аварийном или резервном видах топлива. С этой задачей справляется установка дополнительных котлов, работающих на мазуте или дизельном топлив. Применение такой технологии максимально эффективны в малонаселенных жилых пунктах (численностью до 100 тыс. человек). ЖКХ при строительстве, реконструкции либо техническом перевооружении оснащаются резервными котлами, которые стоят законсервированные, и начинают функционировать при неполадках в тепловой системе.

Обязательным условием при выборе котла, применяемого на объекте ЖКХ, является его сертификация и установка, соответствующая действующим в РФ нормам.

Таким образом, выбор приоритетных видов топлива для котельных ЖКХ в населенных пунктах различной численности проживания населения зависят от нескольких условий. К ним можно отнести – наличие местных видов возобновляемых и невозобновляемых видов тепловой энергии, а также соблюдение основных условий по обеспечению экологической и энергетической безопасности социальных объектов и структур ЖКХ, регламентируемых законодательством РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Доктрина энергетической безопасности Российской Федерации;
2. Постановление Правительства РФ от 22.02.2012 № 154 «О требованиях к схемам теплоснабжения, порядку их разработки и утверждения»;
3. Ю.А. Геллер, Е.О. Ходяшов. Изменение теплоты сгорания древесных пеллет в зависимости от степени их торрефикации / Промышленные процессы и технологии. – 2021.– Т 1 № 2 (2021), с. 81-90;
4. Г.В. Рыбкина, А.А. Яблокова. Современное состояние теплоснабжения и его развитие / Промышленные процессы и технологии. – 2021.– Т 2 № 2 № 2(4) (2022), с. 89-99;
5. Стандарт ГОСТ 25543-2013 «Угли бурые, каменные и антрациты. Классификация по генетическим и технологическим параметрам»;
6. Томшин Е.А., Старых А.А., Любская О.Г. Техногенные аварии как элемент техносферной безопасности / Тенденции развития науки и образования", с № 86, Июнь 2022 (Часть 8), с. 19-23.

УДК 504.062 DOI: 10.37816/eeste-2024-1-264-266

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СХЕМ РАЗМЕЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОДОВ ДЛЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ ГРУНТОВ ОТ ТЕХНОГЕННЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ
DETERMINATION OF ELECTRODE PLACEMENT SCHEMES FOR ENERGY-EFFICIENT ELECTROCHEMICAL SOIL CLEANING FROM MAN-MADE POLLUTANTS

Николай Сергеевич Шулаев, Рамиль Римович Кадыров,
Валерия Валерьевна Пряничникова
Nikolay S. Shulaev, Ramil R. Kadyrov, Valeria V. Pryanichnikova

Уфимский государственный нефтяной технический университет, Россия, Стерлитамак
Ufa State Petroleum Technological University, Russia, Sterlitamak
(e-mail: r_kadyrov@mail.ru)

Аннотация: Рассмотрен высокоэффективный процесс электрохимической очистки грунта, загрязненного нефтепродуктами и приведены различные варианты установок со схемами расположения электродов.

Abstract: The highly efficient process of electrochemical cleaning of soil contaminated with oil products and various options for installations with electrode arrangement schemes are presented.

Ключевые слова: электрический ток, грунт, установки, электрохимическая очистка, нефтепродукты

Keywords: electric current, soil, installations, electrochemical cleaning, oil products

В ряду имеющихся методов очистки грунтов электрохимический выделяется своей особой эффективностью, экономичностью и мобильностью [1-4]. Использование на практике данного метода делает возможным очистку грунта на глубине до нескольких метров на месте (in situ) без необходимости его собирания и вывоза. Электрохимическая обработка загрязненного грунта позволяет проводить его эффективную очистку от фенолов, солей, соединений тяжёлых металлов, а также других веществ [1-2].

В основе этого метода воздействие электрическим током на поллютанты, находящиеся в грунте. Для этого используется установка для создания разности потенциалов на электродах (катоды и аноды), погруженных в грунт. Глубина погружения электродов в грунт определяется степенью проникновения загрязнителя, например нефти и ее продуктов.

Были проведены эксперименты для изучения особенностей электрохимической очистки нефтезагрязненных грунтов, энергетических показателей процессов, а так же разработаны несколько видов установок для осуществления очистки с учетом вида грунта, его степени нефтезагрязнения и рельефа местности.

В случае равномерного загрязнения грунта на ровной местности предлагается использовать погруженные в грунт цилиндрические анод и катод, которые соединяются проводниками. Катоды и аноды целесообразно располагать в шахматном порядке с целью создания более однородного электрического поля (рисунок 1) [3, 4].

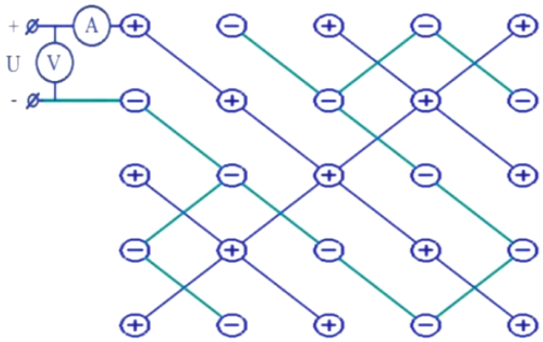


Рисунок 1 — Расположение электродов с равномерным загрязнением почвы на ровной местности

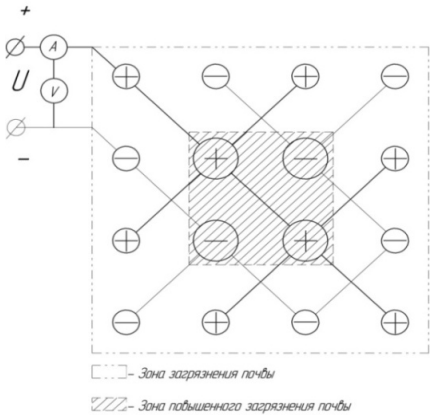


Рисунок 2 — Установка электрохимической очистки с различными радиусами электродов

Суммарный ток между электродами можно рассчитать по выражению

$$I_s = \frac{\pi SH}{L^2 \rho ln \frac{L}{R}} U \quad (1)$$

где H – глубина погружения электродов; U - напряжение между электродами; ρ - удельное сопротивление; R - радиус электрода; L – расстояние между катодом и анодом; S – площадь загрязненного участка.

В том случае, если на местности с ровным рельефом наблюдается неравномерное загрязнение грунта, то для снижения энергопотребления и эффективной очистки можно использовать устройства с электродами разного радиуса (рисунок 2) [3, 4, 5].

Ввиду этого в зонах с высокой концентрацией загрязнений эффективнее использовать электроды с радиусом, большим, чем в других зонах, следуя соотношению [6]

$$\frac{R_п}{R_o} \sim \frac{C_п}{C_o}, \frac{R_п}{R_o} \sim \frac{C_п}{C_o}, \quad (2)$$

где R_n — радиус электродов в области с повышенным загрязнением; R_o - радиус электродов в менее загрязненных областях; C_n – концентрация нефти и/или нефтепродуктов в области с повышенным загрязнением; C_o – концентрация нефти и/или нефтепродуктов в менее загрязненных областях.

Ток между электродами цилиндрической формы с радиусом R, размещенными на расстоянии l между собой, можно определить по формуле

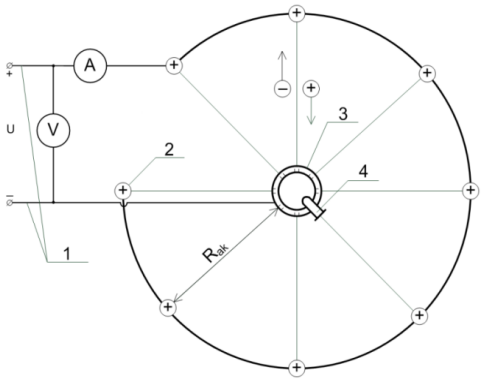
$$I_1 = \frac{2\pi HU R_п}{\rho \ln \frac{l}{R} R_o} \sim \frac{C_п}{C_o}, \quad (3)$$

где ρ – удельное сопротивление грунта; H – глубина погружения электродов.

Суммарный ток между электродами на участке площадью S составит

$$I = 2\frac{S}{l^2} I_1 . \frac{R_п}{R_o} \sim \frac{C_п}{C_o}, \quad (4)$$

Проведение очистки нефтезагрязненного грунта с углублениями может быть выполнена путем установки отрицательного электрода-катода в центре загрязненной области в виде полой перфорированной металлической трубки с водоотводной арматурой, через которую выкачивается загрязненная жидкость. По периметру участка устанавливаются аноды (рисунок 3) [7].



1 — источник электрического тока, подключаемый к выводам; 2 — цилиндрические аноды; 3 — катод; 4 – арматура для удаления загрязненной жидкости

Рисунок 3 — Схема размещения электродов

Электрический ток между анодами и катодом при указанном размещении электродов можно выразить по формуле

$$I = \frac{USN}{\rho l}, \frac{R_п}{R_о} \sim \frac{C_п}{C_о}, \quad (5)$$

где ρ — удельное сопротивление грунта; N — число анодов; S — эффективная площадь канала электрического тока между анодом и катодом; ll — межэлектродное расстояние.

Значения тока I и напряжения U заданного размера катода и анода устанавливаются в соответствии с требуемой степенью очистки и временем обработки почвы.

Выводы

Полученные закономерности электрохимической очистки нефтезагрязненныхгрунтов для представленных схем и конструкций установок позволят определять параметры установок и наиболее эффективные режимы работы, способствуя достижению более высокой степени очистки территорий при различной концентрации загрязнения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ferrarese, E. Application Of Electrochemical Techniques For The Remediation Of Soils Contaminated With Organic Pollutants / E. Ferrarese, G. Andreottola //Proceedings of the Annual International Conference on Soils, Sediments, Water and Energy. - 2010.- 13.

2. Королев В.А. Очистка грунтов от загрязнений. М.: МАИК Наука/интерпериодика, 2001. 365 с.

3. Шулаев Н.С., Пряничникова В.В., Кадыров Р.Р., Быковский Н.А., Овсянникова И.В. Воздействие электрического тока на почвы, загрязненные нефтепродуктами / Бутлеровские сообщения. 2020. Т. 61. № 2. С. 132-138.

4. Meshalkin V.P., Shulaev N.S., Chelnokov V.V., Pryanichnikova V.V. and Kadyrov R.R. Determination of electrical parameters for the electrochemical treatment of soils contaminated with oil // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. № 537 (062069).

5. Shulaev N.S., Meshalkin V.P., Pryanichnikova V.V., Kadyrov R.R., Bykovsky N.A. Electrochemical cleaning of oil-contaminated soils taking into account the terrain. *Ecology and industry of Russia.* 2022. V. 26. N 2. P. 9-13 (in Russian). DOI: 10.18412/1816-0395-2022-2-9-13.

6. Шулаев, Н. С. Закономерности электрохимической очистки нефтезагрязненных грунтов / Н. С. Шулаев, В. В. Пряничникова, Р. Р. Кадыров // Записки Горного института. – 2021. – Т. 252. – С. 937-946. – DOI 10.31897/PMI.2021.6.15.

7. Monocathode installation for electrochemical cleaning of oil-contaminated soils / V. P. Meshalkin, N. S. Shulaev, R. R. Kadyrov, V. V. Pryanichnikova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volgograd, 17–18 июня 2021 года / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering. Vol. Volume 848. – Krasnoyarsk, Russian Federation: IOP Publishing Ltd, 2021. – P. 12142. – DOI 10.1088/1755-1315/848/1/012142.

УДК 628.8:675 DOI: 10.37816/eeste-2024-1-267-269

МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОКЛИМАТА РАБОЧЕЙ ЗОНЫ МОКРЫХ ЦЕХОВ КОЖЕВЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ
MODELING THE MICROCLIMATE OF THE WORKING AREA OF WET SHOPS OF TANNERY ENTERPRISES

Артем Александрович Рослый, Олег Иванович Седляров
Artem A. Roslyi, Oleg I. Sedlyarov

Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), Россия, Москва
The Kosygin State University of Russia, Russia, Moscow
(e-mail: Sedlyarov-oi@rguk.ru)

Аннотация: Рассмотрены особенности микроклимата мокрого цеха кожевенного предприятия, приведены методы, направленные на повышение качества микроклимата рабочей зоны.

Abstract: The features of the microclimate of the wet shop of a tannery are considered, methods aimed at improving the quality of the microclimate of the working area are given.

Ключевые слова: мокрый цех, микроклимат, кожевенное предприятие.

Keywords: wet shop, microclimate, tannery.

Мокрые цеха в кожевенном производстве играют ключевую роль в обработке сырья и подготовке кожи перед следующими этапами производства. Этот этап включает в себя ряд процессов, направленных на удаление загрязнений, консервацию кожи и придание ей определенных свойств. Мокрый цех кожевенного производства характеризуется высокой влажностью воздуха, которая может достигать 80-90%. В таких условиях происходит интенсивное выделение тепла от оборудования и работающих людей, что может привести к перегреву и ухудшению здоровья работников. Для предотвращения этого необходимо обеспечить эффективную вентиляцию помещения и установить системы кондиционирования воздуха. [1, 2]

Объектом исследования в работе является качество микроклимата в рабочей зоне мокрого цеха кожевенного предприятия. В работе рассматриваются технологии и методы, направленные на повышение качества микроклимата рабочей зоны, включая внедрение новых подходов к оценке и определению параметров воздушной среды в проектируемых и реконструируемых цехах кожевенных предприятий.

Оптимальный микроклимат характеризуется сочетанием таких параметров, которые обусловливают сохранение нормального функционального состояния организма без напряжения реакций терморегуляции. Он создает ощущение теплового комфорта и предпосылки для сохранения высокого уровня работоспособности, т. е. обеспечивает оптимальное тепловое состояние человека. Одним из важных интегральных показателей теплового состояния организма человека является средняя температура тела. Она зависит от степени нарушения теплового баланса и уровня энергозатрат при выполнении физической работы. [3]

Специфика технологии в мокрых цехах кожевенного производства определяется жидкостными процессами с использованием большого количества воды повышенной температуры, доходящих до 40 – 45 °С в преддубильных и дубильных операциях и до 65 – 75 °С при жировальных операциях. Использование огромного количества подогретой воды создает повышенную температуру и влажность воздуха в производственных цехах кожевенного производства. Объемно-планировочные решения цехов предопределяют состояние воздушной среды. Так распространенная небольшая высота помещений до 4 – 4,5

м не позволяет разместить эффективные вентиляционные системы, позволяющие локализовать и удалять загрязненный воздух из рабочей зоны. В таких помещениях создается повышенная влажность воздуха, конденсат на потолках, а также воздействие влаги на вентиляционные воздуховоды и арматуру перекрытий. Для достижения нормативного качества воздуха рабочей зоны в мокрых цехах кожевенных заводов необходима правильная организация воздухообмена. Анализ нормативно-методических документов показывает, что определение необходимого воздухообмена в мокрых цехах кожевенных заводов не всегда учитывает специфику и технологические особенности технологических процессов. На существующих предприятиях оценка состояния микроклимата помещений осуществляется с данными инструментальных измерений параметров воздушной среды. Проектирование новых предприятий, реконструкция и перевооружение цехов осуществляется на основе требований утвержденных нормативов, которые устанавливают усредненные данные температуры, влажности и подвижности воздуха. Помещения цехов кожевенного производства характерны тем, что параметры микроклимата изменяются не только на протяжении рабочей смены, но и различны на отдельных участках производственного помещения и могут отличаться на 3 – 10 °С по температуре, и на 15 – 30% по относительной влажности. Даже при выполнении всех нормативных требований в мокрых цехах кожевенных заводов образуются зоны, в которых температура воздуха и концентрация водяных паром существенно отличается от средних значений. Как правило это зоны, расположенные в непосредственной близости от мест тепло- и влаговыделений, и зоны, в которых движение воздуха ограничивается технологическим оборудованием, элементами конструкций или другими факторами. Поэтому для прогнозирования изменений состояния микроклимата в мокрых цехах в проектируемых и реконструируемых цехах кожевенных предприятий необходим иной подход к оценке и определению параметров воздушной среды. Одним из таких подходов является вычислительная гидродинамика CFD (Computational fluid dynamics). [4]

В настоящее время существует три основных метода моделирования процессов турбулентного тепломассопереноса: прямое численное моделирование (Direct Numerical Simulation, DNS), метод крупных вихрей (Large Eddy Simulation, LES) и метод, базируется на решении осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (Reynolds Averaged Navier Stokes, RANS). В отличии от расчетов по нормативно-методическим документам и экспериментальным исследованиям моделирование позволяет получить поля температур, влажности, скоростей и др. как для помещения цеха в целом, так и для отдельных рабочих мест, и оценить динамику изменения этих параметров во времени, например, в течение рабочей смены [5].

Выводы

В работе были рассмотрены технологии и методы, направленные на повышение качества микроклимата рабочей зоны в проектируемых и реконструируемых мокрых цехах кожевенных предприятий. Современные методы математического моделирования позволяют получить прогнозные параметров микроклимата на рабочих местах в проектируемых и реконструируемых цехах кожевенных предприятий, а также оценить эффективность планируемых мероприятий по улучшению условий труда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 40-2021 «Дубление, крашение, выделка шкур и кожи» (утв. приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 декабря 2021 г. N 2963).

2. Гуторова, Н. В. Микроклимат помещений кожевенных предприятий и его моделирование / Н. В. Гуторова, Н. С. Тихонова // Дизайн и технологии. – 2018. – № 65(107). – С. 69-75. – EDN YLVIXZ.

3. Куренкова, Г. В. Микроклимат производственных помещений: учебное пособие для студентов // Г. В. Куренкова, Е. В. Жукова, Е. П. Лемешевская; ФГБОУ ВО ИГМУ Минздрава России, Кафедра профильных гигиенических дисциплин. – Иркутск: ИГМУ, 2020.

4. Численныйалгоритммоделированиядвухфазныхтеченийсучетомсжимаемости, вязкости и массовых сил/ Крапошин М. В., Кухарский А. В., Корчагова В. Н., Шевелёв А. А.//Промышленные процессы и технологии. 2022. Т.2. No3(5). С.6–27. DOI: 10.37816/2713-0789-2022-2-3(5)-6-27

5. Моделирование температурно-влажностного режима воздуха рабочей зоны сушильных цехов кожевенного производства / В. В. Седляров, Н. С. Тихонова, В. В. Куранов, Г. А. Свищев // Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов в различных отраслях промышленности и агропромышленном комплексе : сборник научных статей Первых Международных Лыковских научных чтений, посвящённых 105-летию академика А.В. Лыкова, Москва, 22–23 сентября 2015 года. – Москва: Закрытое акционерное общество "Университетская книга", 2015. – С. 436-440. – EDN UJKNLB.

УДК 614.8 DOI: 10.37816/eeste-2024-1-269-273

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЗАЩИТЫ ОТ ОПАСНОСТЕЙ НА ОСНОВЕ ВАРИОФИКАЦИИ ТЕХНОГЕННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ
IMPROVING PROTECTION AGAINST HAZARDS BASED ON THE VARIOFICATION OF TEXNOGENIC IMPACTS

Константин Васильевич Чернов
Konstantin V. Chernov

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина, Россия, Иваново
Ivanovo State Power University named after V.I. Lenin, Russia, Ivanovo
(e-mail: sistemnolog@mail.ru

Аннотация: Приведены правила и пример вариофикации техногенных воздействий, представляющей собой выявление процессов в системе, перемежаемых событиями, которые приводят к техногенному происшествию.

Abstract: The rules and an example of variofication of technogenic impacts are given, which is the identification of processes in the system interspersed with events that lead to a technogenic incident.

Ключевые слова: вариофикация, техногенное воздействие, природный газ, взрыв.
Keywords: variofication, technogenic impact, natural gas, explosion.

Техногенная вариофикация как системнологический приём представляет собой выявление совокупных последовательностей детерминированных и стохастических процессов в системе, перемежаемых событиями, которые приводят к техногенному происшествию, за которым неизбежно следуют процессы вещественно-энергетического воздействия технетических компонентов на антропные, т.е. процессы техногенного воздействия [1].

Всякий процесс в системе — это изменение во времени состояния компонента вследствие внутрикомпонентного или межкомпонентного взаимодействия, а также изменение во времени состояния взаимодействия вследствие изменения состояния компонентов. Состояние компонента и взаимодействия компонентов в каждый момент выражается значением показателей, характеризующих их свойства. Эти свойства обусловливаются содержанием компонентов и их взаимодействия, которое может быть вещественно-энергетическим или сциентным. Как следствие, индекс процесса, представая разновидностью показателя состояния, должен определяться этим содержанием, т.е. иметь вещественно-энергетическую или сциентную основу, и быть переменным во времени. Скорость процесса есть производная от индекса процесса по времени. Общесистемный процесс – это процесс, в

котором участвуют все взаимодействующие компоненты системы. В парциальные процессы вовлечены отдельные компоненты или взаимодействия каких-либо компонентов.

Процесс перемежается событиями. Событие начинает или завершает процесс, а также разделяет его на стадии. Событие является кратковременной частью процесса со скоростью, имеющей экстремальное значение, вторая производная которой от индекса процесса по времени принимает нулевое значение. Процесс в зависимости от своей продолжительности может быть длительным и кратковременным.

Детерминированный процесс – это процесс, предопределённый функцией системы. Детерминированный процесс может быть целесообразным, способствующим исполнению функции системы, и сопутствующим, сопровождающим исполнение функции. Целесообразный детерминированный процесс начинается с события, выражающего собой начало исполнения компонентом своей функции. Сопутствующий процесс начинается с события, выражающего собой готовность компонента к исполнению функции, или начало её исполнения. Стохастический процесс – это процесс, который не способствует исполнению функции системы. Он начинается со стохастического события, т.е. с происшествия, выражаемого дисфункцией компонента или вызываемого дисфункцией. Дисфункция технетического компонента есть отказ исполнения им своей функции. Дисфункция антропного компонента представляет собой выполнение ошибочного или неисполнение требуемого действия.

Всякое происшествие завершает одни процессы и начинает другие. Происшествие может также разделять процесс на стадии. Стохастические процессы начинаются происшествиями завершающими

– одновременно протекающие, т.е. синхронные, детерминированные процессы;

– стохастические процессы, вызываемые дисфункцией антропных компонентов системы;

– стохастические процессы, вызываемые дисфункцией компонентов внешней среды.

Техногенное происшествие есть стохастическое событие в системе, которое непреложно начинает неизбежные процессы, приводящие к поступлению вещества или энергии в антропный организм. Техногенное происшествие завершает предваряющие процессы, которым могут предшествовать промежуточные и первоначальные процессы, начинаемые и перемежаемые событиями. Совокупный процесс, охватывающий процессы высвобождения вещества и энергии из технетического компонента с образованием или без образования преходящих компонентов, процессы перемещения вещества и энергии в посредниках, а также процессы поступления вещества и энергии в антропный организм, предстаёт процессом техногенного воздействия.

Предваряющий процесс есть опережающий процесс, оканчивающийся техногенным происшествием. Техногенное происшествие может завершать один или несколько предваряющих процессов. Предваряющие процессы сходиться в техногенном происшествии по отдельности или совокупно по условию совместности, которое может принимать значения «И», «ИЛИ».

Всякий предваряющий процесс начинается предвещающим, т.е. продромальным, технетическим или антропным событием. Некоторые предваряющие процессы могут начинаться продромальным событием, которое также является отправным. Событие может относиться к детерминированным или стохастическим. Продромальное событие есть технетическое или антропное событие, начинающее предваряющий процесс. Отправное событие есть начальное событие, которое принимается таким без выявления процессов, заканчивающих его. Технетическое стохастическое событие, т.е. происшествие, состоит в дисфункции технетического компонента, представляющей собой его отказ исполнения своей функции. Антропное происшествие заключается в дисфункции работника, проявляющейся выполнением ошибочного или неисполнением требуемого действия.

Продромальное технетическое событие в системе завершает собой промежуточные или первоначальные, т.е. примордиальные, процессы, которое начинает предваряющие процессы. Продромальное антропное событие в системе начинает предваряющие процессы.

Отправное технетическое или антропное событие в системе начинает примордиальный процесс, который может быть промежуточным или предваряющим. Промежуточный процесс может начинаться отправным или промежуточным происшествием и заканчиваться промежуточным или продромальным событием. Всякий процесс может перемежаться технетическим или антропным событием.

Вариофикация техногенных воздействий должна проводиться в соответствии со следующим правилами:

1. Всякий процесс начинается, перемежается и заканчивается событием.
2. Всякое событие принадлежит процессу, оно начинает, перемежает или завершает этот процесс.
3. Событие, завершая один процесс, может начинать другой или другие.
4. Событие, начиная другой процесс, может завершать один или несколько процессов.
5. Стохастическое событие, непреложно начинающее неизбежные процессы, которые приводят к поступлению вещества или энергии в антропный организм, является техногенным происшествием.
6. Техногенное происшествие как событие завершает предваряющие процессы.
7. Предваряющие процессы начинаются продромальными событиями, которыми могут быть отправные события, принимаемые такими без обозначения предшествующих процессов.
8. Продромальным событиям предшествуют, промежуточные процессы, промежуточные события, примордиальные (первоначальные) процессы и отправные события.
9. Последовательно и параллельно протекающие процессы, приводящие к техногенному происшествию, затем к процессам техногенного воздействия, начинаются с отправных событий, которое принимаются такими без обозначения предшествующих процессов.

Технетическая система, относительно которой далее проводится вариофикация техногенных воздействий, – система газоснабжения цеха по производства метанола, функция которой заключается в обеспечении природным газом требуемого давления с расчётным расходом и без потерь установки конверсии метана. Объектом вариофикации выбран компонент системы газоснабжения – трубопровод, транспортирующий газ от запорного устройства на выходе пункта редуцирования газа (ПРГ) до запорного устройства перед газоиспользующей установкой. Функция трубопровода – обеспечение подачи газа по герметичной трубе от запорного устройства на выходе ПРГ до запорного устройства перед установкой конверсии.

Вариофикация стохастических техногенных воздействий, сопровождающих использование природного газа, начинается после их идентификации, позволяющей выбрать и именовать техногенное происшествие. Идентификация стохастических техногенных воздействий, сопровождающих использование природного газа, приводит к выявлению техногенного воздействия, которое является взрывным. Для вариофикации выбирается техногенное происшествие с названием: «Возникновение ударной волны дефлаграционного взрыва газовоздушной смеси, образовавшейся в помещении цеха вследствие утечки природного газа из газопровода и воспламенившейся от источника зажигания (/S_0/)».

Техногенное происшествие /S_0/ завершает предваряющий процесс распространения пламени /$p_1.S_0$/. Процесс распространения начинается продромальным происшествием «Зажигание горючей смеси (/$s_1.p_1.S_0$/)». Происшествие /$s_1.p_1.S_0$/ завершает промежуточный процесс локального нагрева горючей смеси /$p_1.s_1.p_1.S_0$/. Процесс локального нагрева горючей смеси начинается с происшествия «Возникновение в помещении пространства, заполненного горючей смесью, и источника зажигания (/$s_2.p_1.s_1.p_1.S_0$/)».

Происшествие /$s_2.p_1.s_1.p_1.S_0$/ происходит при совпадении двух процессов:

– процесс перемешивания газа и воздуха с образованием в помещении цеха пространства с газовоздушной смесью, способной к турбулентному горению /$p_1.s_2.p_1.s_1.p_1.S_0$/;

– процесс, приводящий к возникновению в пространстве с газовоздушной смесью источника зажигания /$p_2.s_2.p_1.s_1.p_1.S_0$/.

Процесс перемешивания газа и воздуха с образованием в помещении пространства с горючей газовоздушной смесью начинается с происшествия «Появление газа в воздушном массиве помещения (/$s_3.p_1.s_2.p_1.s_1.p_1.S_0$/)». Процесс перемешивания газа и воздуха с образованием в помещении пространства с горючей газовоздушной смесью перемежается происшествием «Процесс перемешивания не прерван возможными способами (/sp_1/)».

Возможные способы прерывания процесса перемешивания газа с воздухом с образованием горючей смеси следующие:

– разбавление воздухом образующейся смеси посредством включения аварийной вентиляции;

– разбавление воздухом образующейся смеси посредством вентилирования через дверные и оконные проёмы.

Примордиальный процесс, приводящий к возникновению в пространстве с газовоздушной смесью источника зажигания начинается с отправного происшествия «Происшествие, начинающее процесс, который приводит возникновению в пространстве с газовоздушной смесью источника зажигания(/$s_4.p_2.s_2.p_1.s_1.p_1.S_0$/)».

Процесс, приводящий к возникновению в пространстве с газовоздушной смесью источника зажигания, перемежается происшествием «Процесс не прерван возможными способами (/sp_2/)».

Происшествие появления газа в воздушном массиве начинается процессом утечки газа из газопровода /$p_1.s_3.p_1.s_2.p_1.s_1.p_1.S_0$/. Процесс утечки газа перемежается происшествием «Процесс утечки не прерван возможными способами (/sp_3/)». Возможные способы прерывания процесса утечки газа следующие:

– перекрытие разгерметизированного участка газопровода, обнаруженного после срабатывания газосигнализатора, посредством запорной арматуры;

– перекрытие разгерметизированного участка газопровода, обнаруженного после появления запаха, посредством запорной арматуры.

Процесс утечки газа начинается с происшествия «Скважинная разгерметизация трубы (СРТ) газопровода (/$s_5.p_1.s_3.p_1.s_2.p_1.s_1.p_1.S_0$/)». Технетическое происшествие «СРТ» завершает следующие синхронные детерминированные процессы:

– процесс перемещения газа по герметичной окрашенной трубе /$p_1.s_5.p_1.s_3.p_1.s_2.p_1.s_1.p_1.S_0$/;

– процесс усталостного снижения прочности стенки или сварного шва трубы /$p_2.s_5.p_1.s_3.p_1.s_2.p_1.s_1.p_1.S_0$/;

– процесс внутренней коррозии материала трубы или сварного шва /$p_3.s_5.p_1.s_3.p_1.s_2.p_1.s_1.p_1.S_0$/;

– процесс температурной компенсации размеров трубы /$p_4.s_5.p_1.s_3.p_1.s_2.p_1.s_1.p_1.S_0$/.

Событие, начинающее процесс перемещения газа, – начало подачи газа с заданным значением избыточного давления к установке конверсии «/$s_6.p_1.s_5.p_1.s_3.p_1.s_2.p_1.s_1.p_1.S_0$/».

Событие, начинающее процессы усталостного снижения прочности стенки или сварного шва трубы, внутренней коррозии материала трубы или сварного шва, температурной компенсации размеров трубы – «Принятие газопровода в эксплуатацию /$s_7.p_2$-$p_4.s_5.p_1.s_3.p_1.s_2.p_1.s_1.p_1.S_0$/».

Технетическое происшествие «СРТ» завершает также стохастический процесс наружной коррозии материала трубы или сварного шва /$p_5.s_5.p_1.s_3.p_1.s_2.p_1.s_1.p_1.S_0$/. Событие, начинающее процесс наружной коррозии – «Разрушение слоя окраски трубы(/$s_8.p_5.s_5.p_1.s_3.p_1.s_2.p_1.s_1.p_1.S_0$/)». Процесс наружной коррозии перемежается происшествием «Процесс наружной коррозии не прерван возможными способами (/sp4/)».

Возможный способ прерывания процесса наружной коррозии – восстановление слоя окраски после своевременного обнаружения повреждений окрасочного слоя.

Результаты вариофикации можно визуализировать посредством изображения «дерева», фрагмент которого представлен на рис.1.

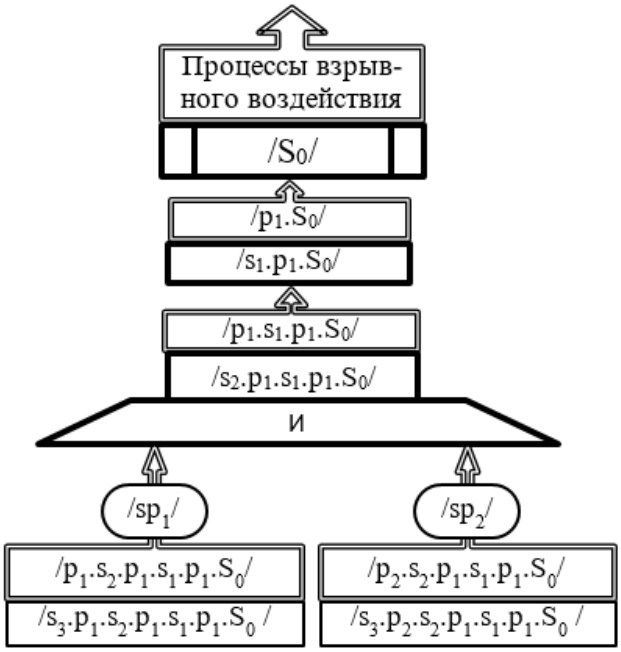


Рисунок 1 — Фрагмент дерева техногенных воздействий

Вариофикация относительно других компонентов системы газоснабжения проводится аналогично.

Выводы. Вариофикация техногенных воздействий позволяет реализовать тотальный подход к проблеме безопасности. Выявление при проведении вариофикации всех событий и процессов и способов прерывания негативных процессов даёт возможность совершенствовать защиту от опасностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чернов К.В. О тотальном подходе к проблеме техногенной безопасности // «Проблемы управления безопасностью сложных систем», труды XVII международной конференции, Институт проблем управления РАН. – М.: РГГУ, 2009. С. 212-216.

УДК 628 DOI: 10.37816/eeste-2024-1-274-279

ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫХ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ИНДУСТРИИ ТУРИЗМА
APPLICATION OF MODERN ENVIRONMENTALLY FRIENDLY INNOVATIVE TECHNOLOGIES IN THE TOURISM INDUSTRY

Дарья Андреевна Смирнова
Darya A. Smirnova

Совет РосСНИО по внедрению инноваций и технологическому развитию Российской Федерации, Россия, Москва
Комитет по туризму Молодежной комиссии Московского координационного совета региональных землячеств при Правительстве Москвы, Россия, Москва
Council of RUSEA for the introduction of innovations and technological development of the Russian Federation, Russia, Moscow
Committee of the Youth Commission of the Moscow Coordination Council of Regional Communities under the Moscow Government, Russia, Moscow
(email: usea1866@gmail.com)

Аннотация: Инновации играют решающую роль в развитии индустрии туризма, позволяя направлениям и предприятиям адаптироваться и процветать в быстро меняющейся среде. В данном статье основное внимание уделяется применению современных экологически чистых инновационных технологий в туристической отрасли. Она подчеркивает важность устойчивых практик в туризме и исследует, как инновационные технологии могут способствовать минимизации воздействия отрасли на окружающую среду.

Abstract: Innovation plays a critical role in the development of the tourism industry, allowing destinations and businesses to adapt and thrive in a rapidly changing environment. This article focuses on the application of modern environmentally friendly innovative technologies in the tourism industry. She highlights the importance of sustainable practices in tourism and explores how innovative technologies can help minimize the industry's environmental impact.

Ключевые слова: инновации, развитие, индустрия туризма, направления, бизнес, адаптироваться, процветать, быстро меняющаяся окружающая среда, современные, экологически чистые, инновационные технологии, устойчивые практики, минимизировать, воздействие на окружающую среду

Keywords: innovation, development, tourism industry, destinations, business, adapt, thrive, rapidly changing environment, modern, environmentally friendly, innovative technologies, sustainable practices, minimize, environmental impact

Актуальность темы заключается в растущей важности устойчивого развития и экологического сознания в туристической индустрии. Современные экологически чистые инновационные технологии могут помочь минимизировать экологический след туристической деятельности, сократить потребление ресурсов, сохранить природное и культурное наследие. Внедрение этих технологий не только соответствует глобальному стремлению к устойчивому развитию, но также решает проблемы экологически сознательных путешественников, что приводит к повышению конкурентоспособности и долгосрочной жизнеспособности туристического сектора.

Поскольку индустрия туризма продолжает расти, растет и обеспокоенность по поводу ее воздействия на окружающую среду. Для решения этих проблем все больше внимания уделяется внедрению экологически безопасных методов, которые минимизируют вред природным ресурсам и экосистемам. Мы рассмотрели применение современных инновационных технологий в индустрии туризма для достижения целей устойчивого

развития. Эти технологии охватывают различные аспекты, включая энергоэффективность, утилизацию отходов, сохранение воды и транспорт.

Технологические достижения проложили путь к энергоэффективным решениям в туристических учреждениях, таким как использование интеллектуальных систем освещения, систем управления энергопотреблением и возобновляемых источников энергии. Эти технологии не только сокращают потребление энергии, но и способствуют экономии затрат для бизнеса. Охватывая эти современные экологически чистые инновационные технологии, индустрия туризма может трансформировать свою практику в сторону устойчивого развития. В этом реферате содержится призыв к внедрению и продвижению таких технологий, поскольку они не только приносят пользу окружающей среде, но и улучшают общий опыт как для туристов, так и для местных сообществ.

Принимая инновации, туристический сектор может повысить конкурентоспособность, качество обслуживания клиентов и общую устойчивость, что приведет к созданию более устойчивой и динамичной отрасли.

К экологически чистым туристическим направлениям Российской Федерации относятся:

1. Озеро Байкал. Это старейшее и самое глубокое пресноводное озеро в мире, известное своей чистейшей водой и уникальной экосистемой.

2. Полуостров Камчатка. Этот регион известен своими вулканами, гейзерами, горячими источниками и разнообразной дикой природой.

3. Горный Алтай. Горный Алтай, расположенный в Сибири, предлагает потрясающие пейзажи, национальные парки и возможности для эко-походов и наблюдения за дикой природой.

4. Кольский полуостров. Этот регион, известный своей нетронутой дикой природой, предлагает возможности для пеших прогулок, рыбалки и наблюдения за дикой природой Арктики.

5. Валдайский национальный парк. Расположенный на Валдайских холмах, этот парк с лесами, озерами и реками обеспечивает спокойную и экологически чистую среду.

6. Национальный парк «Куршская коса». Этот трансграничный парк, расположенный вдоль Балтийского моря, известен своими уникальными песчаными дюнами, разнообразной флорой и путями миграции птиц.

7. Кавказский биосферный заповедник. Эта охраняемая территория, расположенная на Северном Кавказе, известна своим богатым биоразнообразием, включая редкие виды, такие как кавказский леопард.

Существует несколько применений современных экологически чистых инновационных технологий в туризме, в том числе:

Системы возобновляемой энергии. Внедрение солнечных панелей, ветряных турбин или геотермальных систем для питания отелей, курортов и других туристических объектов может снизить зависимость от ископаемого топлива и минимизировать выбросы углекислого газа.

В России есть несколько отелей, использующих альтернативные источники энергии. Вот некоторые примеры:

1. Центр международной торговли CROWNE PLAZA Москва: в этом отеле используются солнечные батареи для выработки электроэнергии и нагрева воды.

2. Отель «У ФОНТАНА» в Москве. Он использует геотермальную энергию для систем отопления и охлаждения.

3. Отель PARK INN BY RADISSON в Сочи. Он включает солнечные батареи и ветряные турбины для выработки возобновляемой энергии.

4. HOLIDAY INN Самара: в этом отеле для производства электроэнергии используются солнечные батареи.

5. Гостиница «СРЕТЕНСКАЯ» в Москве. Для своих энергетических нужд она использует сочетание солнечных батарей и геотермальной энергии.

Умные здания: использование энергоэффективных конструкций, автоматизированных систем и экологически чистых материалов для снижения потребления энергии и образования отходов в жилых помещениях. В Российской Федерации есть несколько примеров умных зданий, демонстрирующих внедрение умных технологий в городской и сельской местности. Вот некоторые примеры:

1. Инновационный центр «Сколково». Представляет собой высокотехнологичный бизнес-центр, включающий в себя различные функции «умного» здания, включая энергоэффективные системы, автоматизированное управление объектами и передовые системы безопасности.

2. Иннополис-Сити. Расположенный в Татарстане, представляет собой новый умный город, в котором особое внимание уделяется технологическим достижениям. Здания Иннополиса оснащены инновационными системами энергоменеджмента, умным освещением и интегрированной инфраструктурой для эффективной городской жизни.

3. Умная деревня «Светлана» — это экологически чистая умная деревня. Расположенная в Калужской области. Объединяет возобновляемые источники энергии, эффективные системы управления отходами и технологии интеллектуальных сетей для создания устойчивой среды обитания.

4. Бизнес-центр «Скайпарк». Расположенный в городе Казань, «Скайпарк» представляет собой современный бизнес-комплекс, в котором используются решения «умного» здания. Он оснащен энергосберегающими технологиями, интеллектуальными системами освещения и передовыми механизмами климат-контроля.

Эти примеры демонстрируют текущие усилия в Российской Федерации по внедрению интеллектуальных технологий в зданиях, как в городских, так и в сельских районах, для повышения энергоэффективности, безопасности и общего качества жизни.

Управление отходами: внедрение передовых технологий переработки и переработки отходов для минимизации воздействия на окружающую среду и продвижения надлежащих методов утилизации отходов.

Экономия воды. Использование инновационных водосберегающих технологий, таких как водосберегающие приспособления, системы переработки сточных вод и сбор дождевой воды, для сокращения потребления воды в отелях и на курортах. В Российской Федерации есть несколько туристических объектов, пропагандирующих сохранение водных ресурсов. Вот некоторые примеры:

1. Озеро Байкал. Будучи самым глубоким и старейшим пресноводным озером в мире, озеро Байкал в Сибири подчеркивает важность сохранения водных ресурсов. Посетителей поощряют сводить к минимуму отходы и загрязнение, а многие инициативы по размещению и экотуризму практикуют устойчивое управление водными ресурсами.

2. Петергофский дворец и сады. Расположенный недалеко от Санкт-Петербурга, этот объект Всемирного наследия ЮНЕСКО демонстрирует потрясающие фонтаны и водные объекты. Прилагаются усилия по экономии воды за счет эффективных методов орошения и использования оборотной воды для фонтанов. 3

3. Парк Горького в Москве – это популярный городской парк поощряет экономию воды, пропагандируя ответственное использование воды. Внедряются экологически чистые методы, включая водосберегающие ирригационные системы, использование местных и засухоустойчивых растений, а также образовательные кампании по экономии воды.

4. Олимпийский парк Сочи. Построенный к зимним Олимпийским играм 2014 года, уделяет особое внимание сохранению водных ресурсов. На объекте используются передовые системы управления водными ресурсами, включая сбор дождевой воды, эффективное орошение и рециркуляцию воды, чтобы сократить потребление воды.

Устойчивый транспорт: продвижение электрических или гибридных транспортных средств, программ совместного использования велосипедов и общественного транспорта для минимизации выбросов углекислого газа от туристического транспорта и поощрения вариантов устойчивой мобильности.

Виртуальная реальность: использование технологии виртуальной реальности для предоставления захватывающих впечатлений, которые позволяют туристам исследовать места назначения без физических путешествий, сокращая выбросы углекислого газа, связанные с дальнемагистральными рейсами.

1. Виртуальные туры. Виртуальная реальность позволяет туристам совершать захватывающие виртуальные туры по местам назначения, прежде чем посетить их физически. Они могут исследовать знаменитые достопримечательности, музеи и достопримечательности, испытывая реалистичное ощущение пребывания там.

2. Тематические парки виртуальной реальности. Некоторые тематические парки интегрируют виртуальную реальность в свои аттракционы, улучшая впечатления посетителей. Гарнитуры виртуальной реальности могут обеспечить дополнительный уровень погружения и интерактивности, делая поездки более захватывающими и запоминающимися.

3. Сохранение культурного наследия. Виртуальная реальность может помочь в сохранении и популяризации культурного наследия. Исторические места, археологические руины и древние артефакты могут быть воссозданы в цифровой форме в виртуальной реальности, что позволяет туристам исследовать и узнавать богатую историю и культуру места.

4. Планирование путешествий. Виртуальная реальность может помочь в планировании путешествий, позволяя пользователям виртуально знакомиться с различными отелями, курортами и вариантами транспорта. Они могут исследовать гостиничные номера, проверять удобства и даже виртуально опробовать различные варианты путешествий, такие как авиабилеты или круизы, что помогает им принимать обоснованные решения.

5. Музеи виртуальной реальности. Музеи могут использовать виртуальную реальность для улучшения впечатлений посетителей. Посетители могут виртуально пройтись по музейным выставкам, подробно рассмотреть произведения искусства и узнать об их истории и значении посредством интерактивного опыта виртуальной реальности.

6. Приключенческий туризм. Виртуальная реальность может предложить захватывающие приключения туристам, которые могут иметь физические ограничения или предпочитают более безопасную альтернативу. Они могут заниматься такими видами деятельности, как виртуальные прыжки с парашютом, скалолазание или подводное плавание, без реального физического риска.

Мобильные приложения: Разработка мобильных приложений, которые в режиме реального времени предоставляют информацию о практиках устойчивого туризма, экологически чистых вариантах проживания и вариантах ответственного путешествия, поощряя туристов делать экологически сознательный выбор.

Искусственный интеллект: использование систем на базе искусственного интеллекта для оптимизации использования ресурсов, энергоэффективности и управления отходами на туристических объектах, что приводит к снижению воздействия на окружающую среду.

Инструменты мониторинга и сохранения экотуризма. Использование спутниковых изображений, дронов и других технологий дистанционного зондирования может помочь в мониторинге и защите хрупких экосистем, обеспечении устойчивой практики туризма и минимизации негативного воздействия на биоразнообразие. Интегрируя эти экологически чистые инновационные технологии, индустрия туризма может повысить устойчивость, минимизировать экологический след и способствовать долгосрочному сохранению направлений.

Строительство экологически чистых туристических территорий предполагает несколько ключевых принципов и практик:

1. Экологичный дизайн. Внедряйте принципы устойчивого дизайна, такие как использование возобновляемых материалов, оптимизация энергоэффективности и интеграция естественной вентиляции и освещения.

2. Зеленая инфраструктура: Развивайте зеленую инфраструктуру, включая зеленые крыши, дождевые сады и проницаемые тротуары, для управления ливневыми стоками и снижения воздействия на местные экосистемы.

3. Сохранение природных ресурсов: защитите и сохраните местные экосистемы, биоразнообразие и природные ресурсы путем реализации таких мер, как лесовосстановление, создание коридоров дикой природы и восстановление среды обитания.

4. Энергоэффективность: внедрение энергоэффективных технологий и возобновляемых источников энергии для минимизации энергопотребления и сокращения выбросов углекислого газа.

5. Управление отходами: создать эффективные системы управления отходами, включая предприятия по переработке и компостированию, чтобы свести к минимуму образование отходов и способствовать ответственному удалению. 6. Экономия воды: установите водосберегающие приспособления, пропагандируйте методы экономии воды и используйте системы сбора сточной и дождевой воды для сокращения потребления воды.

6. Планирование транспорта. Развивайте эффективные транспортные системы, поощряйте использование общественного транспорта, пеших и велосипедных прогулок, а также минимизируйте использование частных транспортных средств для уменьшения загрязнения и заторов.

7. Вовлечение сообщества: Вовлекайте местное сообщество в процессы планирования и принятия решений, обеспечивая их активное участие и поддержку инициатив в области устойчивого туризма.

8. Образование и осведомленность: продвигать программы экологического образования для туристов, местных жителей и предприятий с целью повышения осведомленности об устойчивых практиках и поощрения ответственного поведения.

9. Сертификация и стандарты. Следуйте международно признанным сертификатам зеленого строительства и стандартам устойчивого туризма, чтобы обеспечить соответствие и надежность. Включив эти принципы, экологически чистые туристические зоны могут улучшить впечатления посетителей, сводя к минимуму их экологическое воздействие и способствуя общей устойчивости дестинации.

Выводы

В заключение отметим, что применение современных, экологически чистых инновационных технологий в индустрии туризма имеет решающее значение для обеспечения устойчивости и снижения негативного воздействия туризма на окружающую среду. Эти технологии предлагают ряд решений, таких как системы возобновляемых источников энергии, интеллектуальное управление отходами и эффективные варианты транспортировки. Приняв и внедрив эти технологии, индустрия туризма может минимизировать выбросы углекислого газа, сохранить природные ресурсы и создать более устойчивое будущее как для направлений, так и для путешественников. Использование этих инноваций является не только этическим, но и стратегическим выбором, поскольку оно может повысить конкурентоспособность и привлекательность туристических направлений, одновременно защищая планету для будущих поколений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамова, Е. (2020). Экологические технологии в развитии туристической индустрии: проблемы и перспективы. Туризм и гостеприимство, (4), 54-63.

2. Буравлев, А. (2018). Влияние экологических технологий на развитие экотуризма в России. Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий, 80(1), 35-39.

3. Гончарова, Л. (2019). Инновационные экологические технологии в секторе туризма. Экономика и управление, (5), 74-80.

4. Дудин, М. (2017). Инновационные приемы экологической организации туризма в России. Стратегия и техника социально-экономического развития России, (3), 93-97.

5. Киселева, Н. (2016). Применение инновационных экологических технологий в сфере туризма. Вестник Казанского технологического университета, 23(12), 206-211.

6. Павлович, Т., & Радченко, С. (2018). Инновационные экологические технологии в развитии экотуризма. Вестник Приазовского государственного технического университета, (2), 71-76.

7. Серебрянникова, Н. (2019). Применение экологических технологий в туристической отрасли России. Молодой ученый, (23), 122-125.

8. Чехова, О. (2017). Влияние экологических технологий на развитие туризма в России. Молодой ученый, (12), 135-137.

9. Шестопалова, Ю. (2018). Экологические технологии в туризме: актуальные проблемы и перспективы. Туризм и гостеприимство, 6(2), 229-238.

10. Шульгин, В. (2020). Инновационные экологические технологии в развитии туризма. Трансформация мировой экономики, (2), 136-140.

УДК 621.315.211.9; 628.5 DOI: 10.37816/eeste-2024-1-279-283

ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ВРЕДНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ФАКТОРОВ ПРИ ЭКСТРУЗИИ КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ
FEATURES OF THE INFLUENCE OF HARMFUL PRODUCTION FACTORS DURING THE EXTRUSION OF CABLE PRODUCTS

Анастасия Александровна Мишина, Олег Иванович Седляров
Anastasiya A. Mishina, Oleg I. Sedlyarov

Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), Россия, Москва
The Kosygin State University of Russia, Russia, Moscow
(e-mail: nasty83.79@mail.ru)

Аннотация: Рассмотрены вредные производственные факторы, влияющие на сотрудников предприятий кабельной отрасли при технологическом процессе экструзии.

Abstract: The harmful production factors affecting employees of cable industry enterprises during the extrusion process are considered.

Ключевые слова: кабельные изделия, экструзия, опасные и вредные факторы.

Key words: cable products, extrusion, dangerous and harmful factors.

Жизнь человека – высшая ценность, право на которую закреплено в Конституции РФ. Требования законодательства в области обеспечения безопасной производственной среды распространяются на все организации и предприятия независимо от организационно-правых форм и форм собственности. Охрана труда, как система сохранения жизни и здоровья работников в процессе трудовой деятельности, включает в себя социально-экономические, правовые, санитарно-гигиенические, организационно-технические, лечебно-профилактические, реабилитационные и иные мероприятия. По сути – это способы и действия, направленные на создание благоприятных условий труда, предотвращение травм и несчастных случаев во время рабочего процесса.

Российское законодательство относит к промышленности определенные виды экономической деятельности. Единого правового источника, которым бы регулировалась охрана труда в промышленности — нет, так как любая производственная отрасль имеет свою специфику и риски.

При производстве кабельных изделий, в зависимости от их назначения, различают следующие технологические процессы и операции: скрутка (проволок в токопроводящие жилы и изолированных жил в кабель); изолирование, экранирование (жил, групп, кабелей);

сушку и пропитку (изоляции кабелей); наложение оболочки; наложение защитных покровов. Изолирование может проводиться методом обмотки лентами и/или нитями, методом экструзии, методом наложения лака из раствора или расплава.

Термин «экструзия» означает вытеснение или выдавливание. При экструдировании материал выдавливается через отверстие (фильеру), приобретая необходимую форму. Экструдер является наиболее важной частью линии экструзии. Типовая схема экструзионной линии показана на рисунке 1[1].

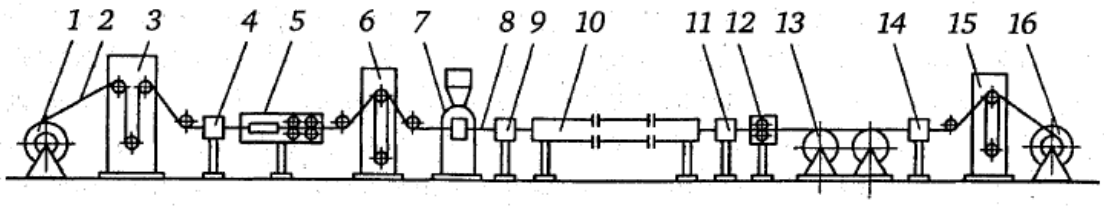


Рисунок 1 — Типовая схема экструзионной линии:
1 — отдающее устройство; 2 — токопроводящая жила или кабельная заготовка; 3, 15 — компенсаторы; 4 — протирочное устройство; 5 — прямильное устройство; 6 — устройство подогрева токопроводящей жилы; 7 — экструдер; 8 — токопроводящая жила или заготовка с наложенным покрытием; 9 — бесконтактный измеритель диаметра; 10 — охлаждающее устройство; 11 — устройство для удаления влаги с поверхности; 12 — контактный измеритель диаметра; 13 — тяговое устройство; 14 — измеритель длины; 16 — приемное устройство.

Принцип действия экструзионной линии заключается в том, что токопроводящая жила или заготовка кабеля с отдающего устройства через компенсатор, протирочное и прямильное устройства поступает в устройство для предварительного подогрева токопроводящей жилы, расположенное перед экструдером. В экструдере полимерный материал нагревается, уплотняется, расплавляется, гомогенизируется и поступает в головку экструдера, где расположен формующий инструмент, который обеспечивает наложение слоя покрытия на токопроводящую жилу или заготовку. После чего покрытие охлаждается в ванне с водой, а затем обдувается воздухом для удаления остатков влаги с поверхности кабельного изделия. Далее кабель, после прохождения контрольно-измерительных приборов, поступает на приемное устройство [2].

Специфика производства кабельных изделий, а именно наложение изоляции и/или оболочки методом экструзии, связано с процессом пластификации полимерных материалов. Твердые гранулы нагреваются до температуры плавления, и полимер переходит в расплавленное состояние. При постепенном охлаждении происходит затвердевание изоляции или оболочки.

Экструдеры – потенциально опасные устройства. При неправильной работе оборудования возможны серьезные аварии. Поэтому необходимо, чтобы люди, работающие на экструзионных линиях, прошли всестороннюю подготовку по технике безопасности.

Состояние микроклимата (температура воздуха и поверхностей, относительная влажность и скорость движения воздуха), уровень шума и вибрации, освещенность должны соответствовать действующим санитарным правилам. Отопление и вентиляция производственных помещений должны соответствовать требованиям действующей Системы стандартов безопасности труда к воздуху рабочей зоны. Факторы производственной среды и трудового процесса, воздействующие на работника, должны соответствовать гигиеническим нормативам [3, 4].

Можно выделить следующие опасные и вредные факторы, которые могут оказать негативное воздействие на работников экструзионных линий:

1. Повышенная температура воздуха рабочей зоны. Представляет собой опасность перегрева организма, что может перерасти в тепловой удар, обморок. Организация приточно-

вытяжной вентиляции, обеспечение питьевой водой и, при необходимости, воздушное душирование, поможет избежать возникновение данного фактора.

2. Повышенная температура поверхностей оборудования и материалов. Риск получения термического ожога можно минимизировать, соблюдая требования техники безопасности, используя средства индивидуальной защиты (СИЗ) – термостойкие перчатки, и размещая на оборудовании предупредительные знаки.

3. Повышенные уровни шума и вибрации. Для снижения уровня шума в производственных помещениях необходимо использовать строительно-акустические средства. Зоны с эквивалентным уровнем звука выше гигиенических нормативов должны быть обозначены знаками опасности. Для защиты органов слуха необходимо использовать сертифицированные наушники или специальные вкладыши (беруши). Снижать уровень вибрации в источнике образования механических колебаний необходимо конструктивными и технологическими мерами.

4. Движущиеся машины и механизмы. Барабаны с жилой, заготовкой, проводом или кабелем в основном перемещаются с помощью транспорта. Нанесение разметки на полу, выделяющей зону оборудования, зону движения транспорта и зону для движения персонала, и соблюдение требований техники безопасности предотвратит риск получения травмы и несчастных случаев на предприятии.

5. Подвижные части производственного оборудования. Медная жила проходит через всю линию экструзии, перематываясь с отдающего устройства на принимающее. В процессе на жилу изолированную или неизолированную накладывается изоляция и/или оболочка. Прохождение жилы и все движущиеся механизмы являются потенциально опасными источниками травматизма. Строгое соблюдение техники безопасности и прохождение инструктажа предотвращает опасность травмирования.

6. Повышенная концентрация вредных веществ в воздухе рабочей зоны. При экструзии полимерных материалов могут выделяться вредные газы, состав которых определяется видом перерабатываемого материала. В таблице 1 показаны вещества, которые могут выделяться при переработке основных полимерных материалов при производстве кабельной продукции.

Содержание вредных веществ в *воздухе рабочей зоны* не должно превышать предельно допустимых концентраций (*ПДК*). *Превышение ПДК* представляет собой реальную *опасность* для здоровья. Очень важно проводить контроль за содержанием вредных веществ и, в случае превышения ПДК, срочно принимать меры по устранению данного нарушения. Соблюдение технологического процесса, использование качественного сырья и местной/локальной вентиляции способствует снижению концентрации вредных веществ в воздухе рабочей зоны.

7. Вредные химические вещества, образующиеся при повышенной температуре в процессе переработки. Особое внимание следует обратить на факторы производственной среды и производственные процессы, обладающие канцерогенными свойствами. При технологическом процессе экструзии в соответствии с Санитарными правилами [10] можно выявить химический фактор - выделение в воздух рабочей зоны формальдегида и винилхлорида. При наличии данного фактора, кроме обязательной разработки программы производственного контроля, работодатель обязан [11] сформировать паспорт канцерогенноопасной организации, согласовав его с территориальным органом Роспортебнадзора. А также разработать санитарно-противоэпидемиологические (профилактические) мероприятия.

Таблица 1 – Вещества, выделение которых возможно при экструзии полимеров

Перерабатываемый материал	Наименование загрязняющего вещества
Пластикат Поливинилхлоридный [5]	Хлористый водород
	Винилхлорид
	Пары пластификатора ДОФ
	Пары пластификатора ДИНФ (диизононилфталат)
	Дифенилол пропан
Полиэтилен [6]	Формальдегид
	Ацетальдегид
	Органические кислоты (в пересчете на уксусную кислоту)
	Оксид углерода
	Аэрозоль полиэтилена
	Хлорид водорода (Гидрохлорид)
Полипропилен [7]	Формальдегид
	Ацетальдегид
	Органические кислоты (в пересчете на уксусную кислоту)
	Оксид углерода
	Аэрозоль полипропилена и сополимеров пропилена
Безгалогенная композиция [8]	Ацетальдегид
	Формальдегид
Фторопласт [9]	Фтористый водород
	Оксид углерода

В связи с этим можно рекомендовать следующие мероприятия при выделении формальдегида и винилхлорида в процессе экструзии:

- постоянный контроль содержания канцерогенноопасного вещества в воздухе рабочей зоны в соответствии с установленными требованиями [12];
- соблюдение технологических режимов при переработке материалов;
- проведение регулярного осмотра вентиляционной системы для оценки её технического состояния;
- медосмотры с участием онколога;
- обеспечение сотрудников СИЗ – респираторами;
- при проведении специальной оценки условий труда учитывать наличие производственного канцерогенного фактора;
- при проведении инструктажа информировать лиц, поступающих на работу, а также работников организации, которые могут подвергнуться воздействию производственного, канцерогенного фактора, об опасности такого воздействия и мерах профилактики.

Выводы

Выявлены опасные и вредные факторы, которые могут оказать негативное воздействие на персонал в процессе экструзии кабельных изделий, и даны рекомендации по минимизации воздействия данных факторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Леонов В.М., Пешков И.Б., Рязанов И.Б. и др. Основы кабельной техники. М.: Издательский центр «Академия», 2006. 432 с.

2. Балашов А.И., Боев М.А., Воронцов А.С. и др. Кабели и провода. М.: Энергоатомиздат, 2009. 470 с.

3. Шерышев М.А. Организация и проектирование предприятий переработки пластмасс. СПб.: ЦОП «Профессия», 2018. 384 с.

4. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания: (СанПиН 1.2.3685-21). 2021, https://docs.cntd.ru/document.

5. ГОСТ 5960-72 «Пластикат поливинилхлоридный для изоляции и защитных оболочек проводов и кабелей». М.: Издательство стандартов. 1989. 42 с.

6. ГОСТ 16336-2013 «Композиции полиэтилена для кабельной промышленности». М.: Стандартинформ. 2014. 28 с.

7. ГОСТ 26996-86 «Полипропилен и сополимеры пропилена». Технические условия. М.: ИПК Издательство стандартов. 2002. 34 с.

8. ТУ 22.21.30-500-05761784-2017 «Пожаробезопасные полиолефиновые композиции, не содержащие галогенов». ПАО «ВХЗ». 2017.

9. ТУ 6-05-1781-84 «Фторопласт -2М». АО «Пластполимер». 1984. 34с.

10. Санитарно-эпидемиологические требования к условиям труда: (СП 2.2.3670-20), 2020, https://docs.cntd.ru/document.

11. Методические указания (МУ 2.2.9.2493-09 Санитарно-гигиеническая паспортизация канцерогеноопасных организаций и формирование банков данных), 2009, https://docs.cntd.ru/document.

12. ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ «Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны», 1989, https://docs.cntd.ru/document.

СЕКЦИЯ 4.
«СОВРЕМЕННЫЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫЕ ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ НОВЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ И НАНОМАТЕРИАЛОВ»

УДК 539.231 DOI: 10.37816/eeste-2024-1-284-287

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА МАГНЕТРОННОГО НАПЫЛЕНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ФУНЦИОНАЛЬНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ НОСИТЕЛЕЙ С ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИМИ СВОЙСТВАМИ
USING THE MAGNETRON SPRAYING METHOD TO OBTAIN FUNCTIONAL TEXTILE CARRIERS WITH ELECTRICALLY CONDUCTIVE PROPERTIES

Газинур Фаилович Байгужин*,, Елена Сергеевна Бокова*,**
Павел Борисович Малышев, Вагиз Равилевич Курбангалеев**,**
Павел Сергеевич Шмелин, Евгений Петрович Гребенников****
Gazinur F. Baiguzhin*,, Elena S. Bokova*, Pavel B. Malyshev**, Vagiz R. Kurbangaleev**,**
Pavel S. Shmelin, Evgeniy P. Grebennikov****

**Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), Россия, Москва*
**The Kosygin State University of Russia, Russia, Moscow*
(e-mail:bayguzhing@mail.ru, esbokova@yandex.ru)
***МИРЭА — Российский технологический университет, Россия, Москва*
***MIREA – Russian Technological University, Russia, Moscow*
(e-mail:grebennikov@mirea.ru, pshmelin@yandex.ru, vageese@yandex.ru, pavel.malyshev2@gmail.ru)

Аннотация: В работе представлены результаты исследований по формированию электропроводящего слоя металла на поверхности различных текстильных материалов методом магнетронного напыления.

Abstract: The work examines the technology of obtaining an electrically conductive metal layer on the surface of textile materials using the magnetron sputtering method.

Ключевые слова: магнетронное напыление, электропроводящие текстильные материалы.

Keywords: magnetron sputtering, electrically conductive textile materials.

Текстильные материалы с электропроводящими свойствами находят широкое применение для изготовления изделий специального назначения, таких как защитные настенные экраны, шторы и жалюзи, исключающие проникновение радиочастотного сигнала из защищаемого помещения, защиты внутренней проводки локальных вычислительных сетей и шин питания, защитной одежды (например, антистатической одежды ESD), снижения помех от радарных установок, изготовления боксов по измерению частотных характеристик радиоэлектронной аппаратуры и др. [1].

Наиболее распространенным подходом к получению электропроводящих текстильных материалов является включение в структуру полотна металлических волокон или электропроводных нитей. При этом металлические волокна должны составлять 45-70% от общего волокнистого состава материала и могут быть полностью выполнены из нержавеющей стали или иметь гальваническое покрытие. К недостаткам таких материалов относится высокая металлоемкость и невозможность производства ткани различных видов переплетений, а также перегрев металлической составляющей ткани в процессе эксплуатации, что может привести к деструкции остальных ее составляющих.

Известны токопроводящие ткани, содержащие переплетенные между собой основные и уточные комбинированные электропроводящие нити, состоящие из электроизоляционной и электропроводной компоненты. В таких материалах экранирующие свойства обеспечиваются сетчатой структурой, образованной металлосодержащими электропроводными основными и уточными нитями, что делает невозможным получение материалов с электропроводящими и экранирующими свойствами на основе трикотажных и нетканых полотен [2].

Другим подходом к получению материалов с электропроводящими и экранирующими свойствами является металлизация их поверхности. Как правило для этого на поверхность текстильного носителя (ткани, марля, трикотаж, тканевые полотна, нетканые материалы любого волокнистого состава) методом магнетронного распыления в низкотемпературной плазме (плазма воздуха, O_2, N_2, Ar, CO_2, NH_3, CF_4, He, H_2, H_2O) наносят тонкие пленки меди, алюминия, титана, латуни, серебра, нержавеющей стали, бронзы, других металлов и их сплавов, а также соединения некоторых металлов с кислородом или азотом [3- 6]. Метод, основанный на использовании аномального тлеющего разряда в инертном газе с наложением на него кольцеобразной зоны скрещенных неоднородных электрического и магнитного полей, позволяет достаточно тонко регулировать толщину металлического слоя, а значит, и его структуру, что важно при создании покрытий с определенными функциональными свойствами.

Цель работы – получение текстильных носителей с электропроводящими свойствами с использованием метода магнетронного напыления.

В качестве объектов исследования в работе использовали ткани с различным составом и переплетением. Характеристика тканей представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристика тканей.

№	Ткань	Переплетение	Состав
1	Сетка	-	100% полиамид
2	Оксфорд	рогожка	100% полиэфир
3	Русар	полотняное	100% параарамид
4	Трикотажное полотно	интерлок	100% полиэфир
5	Ткань антистатическая	полотняное	99% хлопок, 1% антистат. нить

Процесс магнетронного напыления проводили на установке Alcatel SCM 651 (650) (рисунок 1), оснащённой четырьмя магнетронами с диаметром 101,6 мм. Параметры осаждения: предельный вакуум $2*10^{-6}$ мм рт ст., давление Ar внутри камеры $5*10^{-3}$ мм рт. ст., ток разряда 1-3 А; время осаждения внутри вакуумной камеры 20 мин. В качестве мишени для осаждения использовали Ti, Cu, и нерж. сталь AlSI 304 (состав: 69 % Fe; 17 - 19 % Cr; до 0,8 % C; до 0,8 % Si, до 0,2 % Mn; 9 - 11 % Ni; до 0,5% Ti; до 0,3 % Cu; до 0,02 % S; до 0,035 % P)

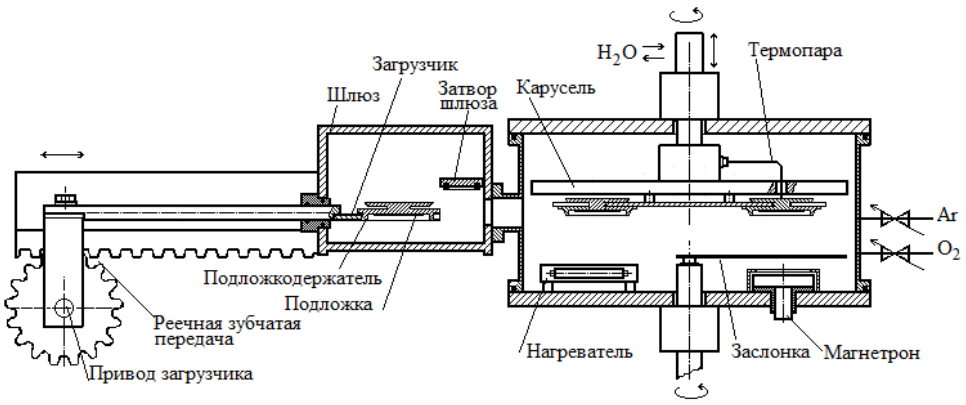


Рисунок 1 — Схема установки магнетронного напыления Alcatel SCM 651 (650).

Образец текстильного материала, закреплённый на держателе подложки, загружали в шлюз. Давление в шлюзе доводили до давления в вакуумной камере ($2*10^{-6}$ мм рт ст). Затем образец закрепляли на карусель и давление в камере доводили до $5*10^{-3}$ мм рт. ст. с помощью Ar. Напыление металла проводили при постоянном вращение образца в течение 20 минут, изменяя при этом ток разряда от 0,5 до 3 А. Сопротивление тканей измеряли с помощью мультиметра Agilent U1253A.. Параметры осаждения и результаты представлены в таблице 2.

Из данных, приведенных в таблице, очевидно, что равномерность осаждения металла при магнетронном напылении зависит от типа ткани. Так, для ткани Оксфорд, состоящей из синтетических волокон на основе полиэфира и имеющей переплетение основы и утка типа рогожка, где уток в несколько раз толще основы, а также дополнительно обработанной гидрофобизирующим составом, при постоянных значениях давления и времени обработки в камере напыления, увеличение тока разряда на Ti мишени от 0,5 до 1,5 А приводит к уменьшению сопротивления с 170-220 до 50-60 Ом. Это связано с увеличением бомбардировки катода (мишень) ионами, которые выбивают больше частиц металла, которые оседают на поверхности полотна, уменьшая ее шероховатость при увеличении толщины напыляемого слоя.

Антистатическая ткань имеет более высокие значения сопротивления при напылении мишенью из Ti по сравнению с Оксфордом, что связано с ее способностью защищать от статического электричества и обеспечивать моментальное стекание заряда.

Таблица 2 – Параметры и результаты проведенных исследований.

Ткань	P (мм рт. ст.)	Время	Мишень	I(A)	R
Русар	$5*10^{-3}$	20	Ti	1	-
			Cu	1,5	-
			Ti Cu	1,5 3	-
Трикотажное полотно	$5*10^{-3}$	20	Ti	1	-
			Cu	2,5	-
			Ti Cu	1,5 3	-
Ткань антистатическая	$5*10^{-3}$	20	Ti	1	350-490 Ом
			Ti Cu	1,5 3	0,6-0,9 кОм
			Нерж.	0,5	600-800 Ом
Сетка	$5*10^{-3}$	20	Ti	1	0,15-0,7 МОм
			Cu	2,5	-
			Ti Cu	1,5 3	-
			Нерж.	0,5	250-400 Ом
Оксфорд	$5*10^{-3}$	20	Ti	0,5	170-220 Ом
			Ti	1,5	50-60 Ом
			Ti Cu	1,5 2	0,25-0,35 Ом
			Ti Cu	1,5 3	0,16-0.2 Ом
			Нерж.	0,5	250-400 Ом

Сетка, состоящая из перекрученных нитей утка и основы и имеющая крупные сквозные отверстия, требует двухстороннего напыления металла. Сетка и Антистатическая ткань имеют

стабильное сопротивление с мишенью из нерж. стали. При значениях тока разряда 0,5 А сопротивление у Оксфорда и Сетки составляет 250-400 Ом, а у Антистатической ткани 600-800 Ом.

У Трикотажного полотна и ткани Русар сопротивление отсутствует. По - видимому на характер напыления помимо состава и структуры ткани существенное влияние оказывает состояние поверхности - наличие ворса, фактуры и т д., что в итоге влияет на проводящие свойства.

Визуальная оценка поверхности тканей с напылением с использованием микроскопа-спектрофотометра МСФУ-К показала, что на электропроводящих материалах имеет место равномерное распределение напыленного металла (рисунок 2 а,б), в отличие от Трикотажного полотна и ткани Русар, где напыление имеет не сплошной характер и имеют место дефекты в виде разрывов между переплетениями (рисунок 2 в). Это, в свою очередь, приводит к отсутствию сопротивления на поверхности обработанного текстильного материала. Такой эффект, как правило, характерен для текстильных материалов из мультифиламентных нитей, где данный способ не позволяет получить стабильную электрическую проводимость в местах их пересечения.

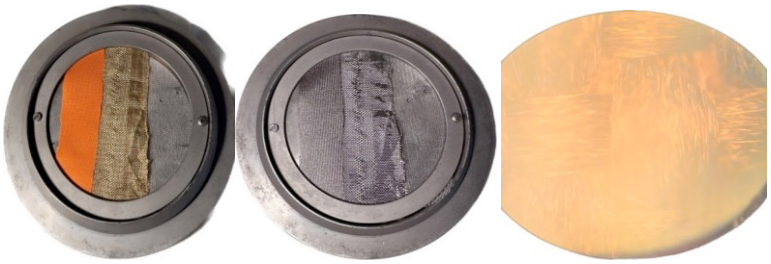


Рисунок 2 — Образцы текстильного материала до и после магнетронного напыления: Оксфорд (а), Сетка (б), Русар (в).

Таким образом, в настоящей работе проведена модификация текстильных полотен методом магнетронного напыления металлов для получения носителей с электропроводящими свойствами. Установлено, что на процесс напыления и электропроводящие свойства текстильных материалов, по мимо химической природы и характера переплетения волокон и нитей, существенное влияние оказывает состояние поверхности тканей, что представляет интерес для дальнейших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сапожников С. В., Сафонов В. В. Перспективность получения и применения электропроводящих текстильных материалов //Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX). – 2018. – №. 1-1. – С. 229-232.

2. Казаков М. Е., Сахарова Т. П. НПЦ «УВИКОМ»: технологии будущего //Технический текстиль. – 2003. – №. 7. – С. 26..

3. Gorberg B.L., Ivanov A.A., Mamontov O.V., Stegnin V.A., Titov V.A. Modifitsirovanie tekstil'nykh materialov naneseniem nanopokrytiy metodom magnetronnogo ionno-plazmennogo raspyleniya [Modification of textile materials by nanocoating by magnetron ion-plasma sputtering]. Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal, 2011. No 3. Pp. 7–13. (rus).

4. Berlin E.V., Dvinin S.A., Seydman L.A. Vakuumnaya tekhnologiya i oborudovanie dlya naneseniya i travleniya tonkikh plenok [Vacuum technology and equipment for applying and etching thin films]. Moscow: Tekhnosfera, 2007. 176 p. (rus)

5. Musil J., Lestina J., Vlcek J., Tolg T. Pulsed DC magnetron discharge for high-rate sputtering of thin films. Journal of Vacuum Science and Technology, 2001. Vol. 19, No. 2. Pp. 420–424. DOI: 10.1116/ 1.1339018

6. Alami J., Gudmundsson J.T., Bohlmark J., Birch J., Helmersson U. Plasma dynamics in a highly ionized pulsed magnetron discharge. Plasma Sources Science and Technology, 2005. Vol. 14, No. 3. Pp. 525–531. DOI: 10.1088/0963-0252/14/3/015.

УДК 678.07 DOI: 10.37816/eeste-2024-1-288-292

ИЗУЧЕНИЕ СПОСОБНОСТИ К ДЕГРАДАЦИИ БИОПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНОК НА ОСНОВЕ ПОЛИКАПРОЛАКТОНА И ПОЛИЛАКТИДА ПРИ КОМПОСТИРОВАНИИ В МОДЕЛЬНОЙ СРЕДЕ
STUDYING THE ABILITY TO DEGRADATE BIOPOLYMER FILMS BASED ON POLYCAPROLACTONE AND POLYLACTIDE DURING COMPOSTING IN A MODEL ENVIRONMENT

Людмила Ивановна Золина *, Элеонора Юрьевна Ефремова,**
Ирина Игоревна Андрусенко **
Lyudmila I. Zolina*, Eleonora Yu. Efremova **, Irina I. Andrusenko **

**Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), Россия, Москва*
**The Kosygin State University of Russia, Russia, Moscow*
(e-mail: zludmila0308@mail.ru)
***ООО "НЦ БИОФОРМ", Россия, Москва*
***OOO "NC BIOFORM", Russia, Moscow*
(e-mail: efremova120800@icloud.com, andrusenkoirina22@mail.ru)

Аннотация: Приведены результаты исследования ускоренной деградации биоразлагаемых полимеров поликапролактона и полилактида. Установлено, что поликапролактон подвержен достаточно быстрой деструкции. Показано влияние на способность к деградации пленки полилактида таких модифицирующих компонентов, как полибутиленадипаттерефталат (PBAT) и крахмал. Установлено, что образцы на основе PBAT разлагаются более эффективно, чем с добавкой модифицированного крахмала.

Abstract: The results of the study of accelerated degradation of biodegradable polymers of polycaprolactone and polylactide are presented. It has been established that polycaprolactone is subject to fairly rapid destruction. The effect of modifying components such as polybutylene adipate terephthalate (PBAT) and starch on the ability to degrade a polylactide-based film is shown. It was found that samples based on PB AT decompose more efficiently than with the addition of modified starch.

Ключевые слова: биодеградация, модифицирующие компоненты, поликапролактон, полилактид

Keywords: biodegradation, modifying components, polycaprolactone, polylactide

Современные материалы для производства упаковки, такие как полиэтилентерефталат, полипропилен, полистирол и другие широко используются из-за низкой стоимости и высокой технологичности. Однако, чрезмерное их использование привело к серьезным экологическим проблемам связанных с утилизацией и неспособностью к биодеградации. Поэтому основные тенденции развития упаковочного производства направлены на разработку и применение материалов, которые утилизируются и разлагаются в окружающей среде без вреда для экологии. Например, материалы, представляющие собой композиции с натуральными наполнителями, которые являются возобновляемыми источниками, способными к биоразложению в окружающей среде под воздействием биологических факторов, таких как микроорганизмы и ферменты [1] .

В процессе биодеградации происходит распад физического объекта под действием окружающей среды, который проявляется в уменьшении массы, объема и изменении физико-химических показателей.

Наиболее перспективными в этом направлении для применения во многих отраслях, включая упаковку, являются такие полимеры, как поликапролактон (PLA) и полилактид (PCL) [2,3].

Полилактид (PLA) - это биополимер, получаемый из L-молочной кислоты, которая в свою очередь производится из крахмала при помощи ферментации. Его можно применять в частности для производства гибридной бумажно-пластиковой биоразлагаемой упаковки.

Поликапролактон (PCL) – это полимер, состоящий из звеньев ε-капролактона, имеющий линейно-разветвленную структуру, и относящийся к алифатическим сложным полиэфирам. Это синтетический полимер, но, он обладает хорошими деградационными свойствами. Его полное его разложение в природе может занять до двух лет. [4]

Для ускорения деградации в пленки на основе полилактида вводят модифицирующие добавки: такие как полибутиленадипаттерефталат (PBAT) - насыщенней полиэфир, который способен к биоразложению, и крахмал [5].

Для изучения ускоренной деградации материалов был использован метод, заключающийся в погружении пленочных образцов в грунт, моделирующий естественную почву. Для более точных результатов исследования разложения материалов, выбранный грунт был аналогичен реальным природным субстратам. В рамках этой работы исследование продолжалось от 6 до 12 месяцев. После того как образцы были извлечены из компоста, их тестировали различными методами. В период компостирования проводился осмотр образцов, определялись физико-механические характеристики, гидрофильность поверхности, санитарно-гигиенические исследования: определение формальдегида и других летучих веществ.

Проведенные исследования показали, что компостирование приводит к изменению внешнего вида образцов и их деструкции.

Так структурные исследования, проведенные перед закладкой на компостное хранение биоразлагаемой пленки состава PLA/PBAT и PLA с крахмалом, показали, что в исходных образцах не было микротрещин, которые могли бы изначально влиять на прочностные показатели.

Анализ поверхности пленок методом сканирующей электронной микроскопии показал, что у образцов без крахмала после компостирования заметны существенные изменения, а именно многочисленные трещины, уменьшение плотности и углубления с рытвинами (рисунок 2). У пленки, которая содержала крахмал, через 12 месяцев заметны немногочисленные трещины и кратеры, что свидетельствует о различной скорости разрушения компонентов (рисунок 1) .

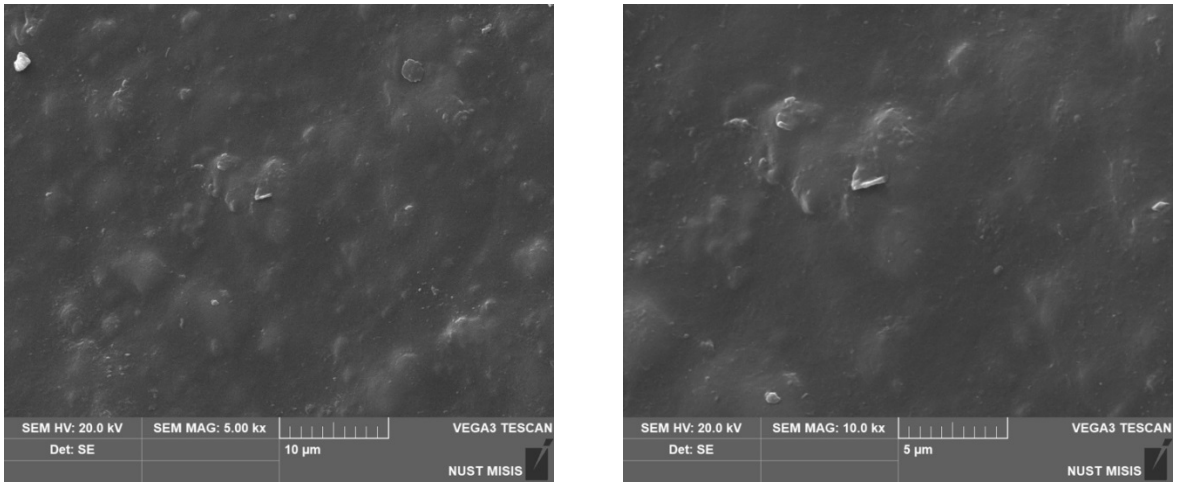


Рисунок 1 — Поверхность пленки состава PLA- крахмал через 12 месяцев компостирования

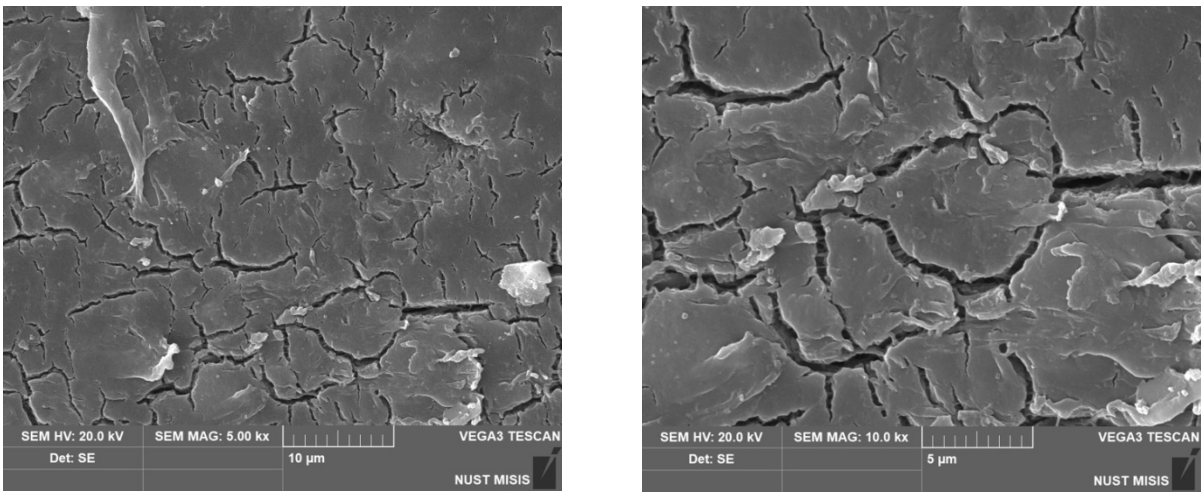


Рисунок 2 — Поверхность пленки состава PLA-PBAT через 12 месяцев компостирования

Полученные результаты исследований поверхности материала хорошо коррелируют с результатами физико-механических испытаний.

Так определение краевого угла смачивания показало, что поверхность пленок поликапролактона (PCL) является гидрофильной, которая увеличивается после 6 месяцев компостирования. Пленка с модифицирующей добавкой PBAT является гидрофильной, которая незначительно увеличивается после компостирования, Поверхность пленок с модифицирующей добавкой крахмал изначально является гидрофобным материалом, но за 12 месяцев компостирования приобретает гидрофильные свойства, о чем свидетельствует краевой угол смачивания равный 84,5-84,7° (таблица 1).

Таблица 1 — Определение краевого угла смачивания пленок PCL и PLA

Полимер	Вид модифицирующей добавки	0 месяц (контроль), °	6 месяц, °	12 месяц, °
Поликапролактон (PCL)	-	60,6	55,3	-
Полилактид (PLA)	PBAT	65,7	62,6	60,1
	крахмал	107,8	90,4	84,5-84,7

В процессе компостирования образцы пленок разрушаются и теряют массу. Было установлено, что модифицирующие добавки оказывают различное влияние на скорость биоразложения объектов. Образцы на основе PLA с добавкой полибутиленадипаттерефталата (PBAT) разлагаются более эффективно, чем с добавкой модифицированного крахмала. На рисунке 3 показано изменение массы образцов пленки PLA с добавкой полибутиленадипаттерефталат (PBAT) за время нахождения в компосте.

Потеря массы составила за 6 месяцев 7,9%, за 12 месяцев около 14%. Потеря массы образцов пленки PLA с добавкой крахмала за 6 месяцев — 6,3%, а за 12 месяцев не превысила 11%, что можно быть связано с набуханием крахмал в образце, приводящее к изменению макроструктуры. Это подтверждается результатами прочностных характеристик. В образцах PLA, не содержащих крахмал, снижение прочности за 6 месяцев в продольном направлении составило 22,12 %, а в поперечном — 38,6%. За 12 месяцев снижение прочности в продольном направлении — 76,13%, в поперечном — 88,68%.

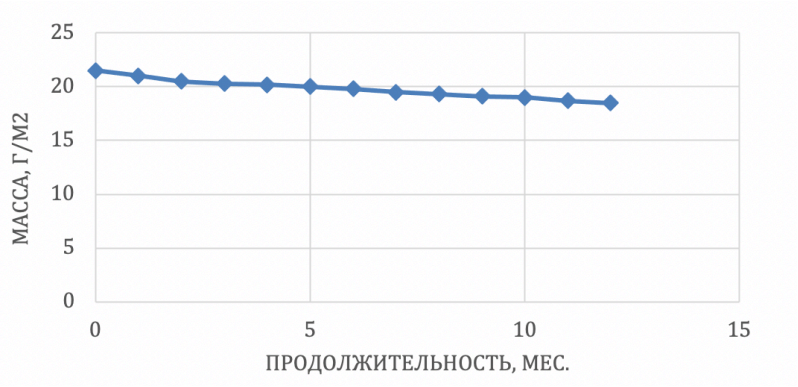


Рисунок 3 — Изменение массы образцов пленки PLA/PBAT в зависимости от времени компостирования

В образцах с добавкой крахмала снижение прочности в продольном направлении за 6 месяцев составило только 8,54%, в поперечном — 35,9%., за 12 месяцев в продольном — 42,6%, а в поперечном направлении — 52,85%.

Для сравнения свойств исследуемых материалов на диаграмме 4 показано изменение массы образцов пленки поликапролактона (PCL), откуда следует, что через 6 месяцев потеря массы составила более 30%, т.е. скорость биодеградации значительно выше, чем у PLA. В образцах пленок поликапролактона изменение прочностных характеристик за 6 месяцев составило в продольного направления 27,8%, а в поперечного - 28,4%..

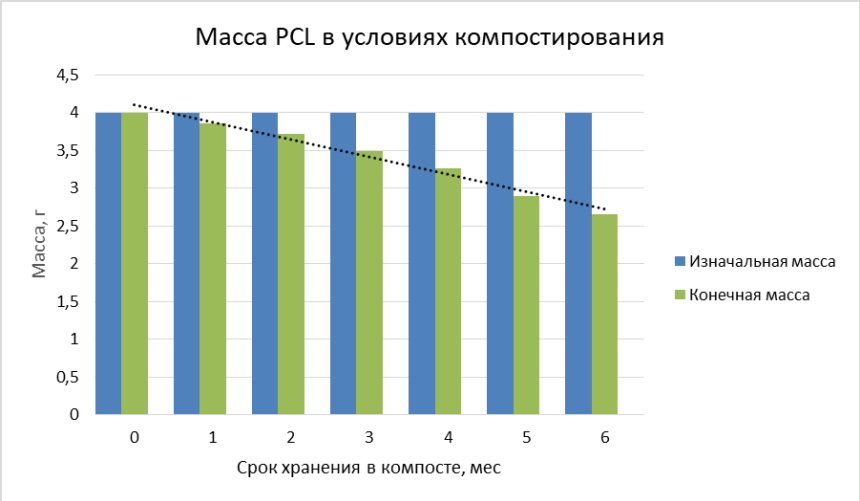


Рисунок 4 — Изменение массы образцов пленки поликапролактона (PCL) за время нахождения в компосте

Вместе с оценкой прочности биоразлагаемых пленок были проанализированы их санитарно-гигиенические свойства, включая миграцию летучих органических соединений методом газовой хроматографиии в модельной среде на основе дистиллированной воды и молочной кислоты с концентрациями 0,3% и 3,0%,.

Было установлено, что у всех исследованных образцов не было увеличения миграции токсичных веществ в пределах допустимых норм. Кроме того образцы не приобретали запаха и осадка на протяжении 12 месяцев эксперимента, что соответствует требованиям нормативных документов [6,7]. Исходя из этого, можно сделать вывод, что исследуемые материалы являются безопасными и пригодными для использования в пищевой промышленности, не оказывая отрицательного воздействия на продукт и потребителя.

Выводы

Приведены результаты исследования ускоренной деградации в модельной среде биоразлагаемых полимеров поликапролактона и полилактида; установлено, что скорость разложения у поликапролактона выше, у полилактида; показано, что способность к деградации пленок полилактида с модифицирующим компонентом PBAT выше, чем с добавкой модифицированного крахмала; установлено, что у всех исследованных образцов не было увеличения миграции токсичных веществ в пределах допустимых норм; исследуемые материалы являются безопасными и пригодными для использования не оказывая отрицательного воздействия на продукт и потребителя

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Почанин Ю. С., Использование биоразлагаемых материалов // - 2020. – 1 с, 16-17 с.
2. Auras R., Loong-Tak Lim, Susan E.M. Selke, Hideto Tsuji. Poly(lactic acid): Synthesis, Structures, Properties, Processing, and Applications// John Wiley & Sons, Inc., 2010. – 499p
3. Woodruff M.A., Hutmacher D.W. The return of a forgotten polymer—Polycaprolactone in the 21st century // Progress in Polymer Science. 2010, №35(10). p. 1217-1256.
4. Л. И. Гарифуллина, Н. И. Ли, Р. М. Гарипов, А. К. Миннахметова, Биоразложение полимерных пленочных материалов // Вестник технологического университета. Казанский национальный исследовательский технологический университет. - 2019. - 48 с.
5. Lam C.X.F. Evaluation of polycaprolactone scaffold degradation for 6 months in vitro and in vivo / Christopher X. F. Lam, Dietmar W. Hutmacher, Jan-Thorsten Schantz // J. Biomed. Mater. Res. part A. – 2009. – Т. 90. – №. 3. – P. 906-919.
6. ГОСТ Р 57432-2017 «Упаковка. Пленки из биоразлагаемого материала».
7. ГОСТ Р 57219-2016 «Определение способности к полному аэробному биологическому разложению и распаду в контролируемых условиях компостирования. Метод с применением анализа выделяемого диоксида углерода».

ANTI-CANCER PROPERTY OF HEMP BIOACTIVE PEPTIDES IN HEP3B LIVER CANCER CELLS THROUGH AKT/GSK3B/B-CATENIN SIGNALING PATHWAY
ПРОТИВОРАКОВЫЕ СВОЙСТВА БИОАКТИВНЫХ ПЕПТИДОВ КОНОПЛИ В КЛЕТКАХ РАКА ПЕЧЕНИ HEP3B ЧЕРЕЗ СИГНАЛЬНЫЙ ПУТЬ AKT/GSK3B/B-CATENIN

Lian-Hui Wei*, Yan Dong*, Yu-Feng Sun*, Xue-Song Mei*, Xue-Song Ma*, Jie Shi*, Qing-li Yang*, Yan-Ru Ji*, Zheng-Hai Zhang*, Hu-Nan Sun*, Xing-Rong Sun**, Shu-Min Song***

**Daqing Branch of the Heilongjiang Academy of Sciences, China, Daqing*
***Daqing Branch of the Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, China, Daqing*
**** College of Life Science and Technology, Heilongjiang Bayi Agricultural University, China, Daqing*

Abstract: Foodborne protein hydrolysates exhibit biological activity that may be therapeutic in a number of human disease settings. Hemp peptides (HP) generated by controlled hydrolysis of hemp proteins have a number of health benefits, and are of pharmaceutical value. In the present study, we produce small molecular weight HP from hemp seed and investigate its anti-cancer properties in Hep3B human liver cancer cells. We demonstrate that HP treatment increased apoptosis, reduced cell viability and reduced cell migration in Hep3B human liver cancer cells without affecting the normal liver cell line L02. We correlate these phenotypes with increased cellular ROS levels, up-regulation of cleaved caspase 3 and Bad, and down-regulation of anti-apoptotic Bcl-2. HP treatment led to increased Akt and GSK-3β phosphorylation, with subsequent down-regulation of β-catenin, suggesting β-catenin signaling modulation as a critical mechanism by which HP exhibits anti-cancer properties. Our findings suggest HP are of potential therapeutic interest for liver cancer treatment.

Аннотация: Гидролизаты белков пищевого происхождения проявляют биологическую активность, которая может иметь терапевтический эффект при ряде заболеваний человека. Пептиды конопли (HP), полученные путем контролируемого гидролиза белков конопли, имеют ряд преимуществ для здоровья и имеют фармацевтическую ценность. В настоящем исследовании мы получаем низкомолекулярный HP из семян конопли и исследуем его противораковые свойства в клетках рака печени человека Hep3B. Мы демонстрируем, что лечение HP увеличивало апоптоз, снижало жизнеспособность клеток и уменьшало миграцию клеток в клетках рака печени человека Hep3B, не затрагивая нормальную линию клеток печени L02. Мы коррелируем эти фенотипы с повышенными уровнями клеточных АФК, усилением регуляции расщепленной каспазы 3 и Bad и снижением регуляции антиапоптотического Bcl-2. Лечение HP привело к усилению фосфорилирования Akt и GSK-3β с последующим снижением регуляции β-катенина, что позволяет предположить, что модуляция передачи сигналов β-катенина является критическим механизмом, с помощью которого HP проявляет противораковые свойства. Наши результаты показывают, что HP представляют потенциальный терапевтический интерес для лечения рака печени.

Keywords: Hemp Seed (*Cannabis sativa L.*); anti-cancer; Hydrolysates; ROS; GSK3β signaling

Ключевые слова: Семена конопли (Cannabis sativa L.); противораковые; гидролизаты; ROS; Передача сигналов GSK3β

Introduction

Cannabis sativa L., commonly known as hemp, is an annual herbaceous plant belonging to the Cannabaceae family, which is cultivated in China and Canada [14]. Hemp has been an important source of raw materials in manufacturing and industry, including use of the hemp seeds, fiber, meal and oil [16]. Industrial hemp seeds are a novel variety of cannabis which contain low levels of δ-9-tetrahydrocannabinol (THC), with a concentration of less than 0.3%; industrial hemp seeds are now legally grown across dozens of countries worldwide [32] and have been used in the development of

numerous products, including clothing, chemicals, bioenergy and food health, among others [50]. The medicinal properties of hemp seeds have been documented for some time, and include inhibition LPS-activated primary human monocytes inflammatory response (for a detailed list see the 2000 edition of the "Pharmacopoeia of the People's Republic of China" and the 2001 edition of "Medicinal and Food Homologous") [6]. The oil extracted from hemp seeds is rich in polyunsaturated fatty acids, proteins and essential amino acids [29].

Protein hydrolysates, produced by conversion of protein to peptides, have demonstrated a range of biological health effects both *in vitro* and *in vivo*, including anti-oxidant, anti-hypertensive, anti-microbial, anti-thrombotic, hypocholesterolemic, mineral-binding, anti-coagulant , immunomodulatory, anti-inflammatory and cyto-modulatory properties. Moreover, several such peptides have been demonstrated to possess more than one of these properties. Over the past decade, exploration and use of hemp peptides (HP) for their health benefitting properties has been proposed. A number of studies have identified specific benefits of HP, including angiotensin covertin enzyme (ACE) inhibition [36], antioxygenation [4], anticholinesterase (AChE) activity [3], cholesterol regulation [49] and regulation of serum glucose levels [33].

Liver cancer is a common malignant tumor of adulthood and represents a major cause of morbidity and mortality worldwide [51]. Liver cancer is rarely diagnosed at early stage; cases typically present with hepatic disease, cirrhosis and poor hepatic function symptomatic of advanced stage cancer [25]. First-line treatment for liver cancer comprises cytotoxic chemotherapy which is associated with serous side effects, including agents such as 5-fluorouracil (5-FU), cisplatin, and shikonin [7]. Hence, novel effective anti-cancer therapies with fewer side effects remain an area of intense research interest in liver cancer treatment.

Among their other biological activities, peptides have demonstrated anti-cancer activity; peptides harbor higher specificity and affinity in comparison to conventional medicines, and are associated with fewer side effects while demonstrated greater tissue penetration [24]. Recently, a number of studies have demonstrated that peptide-like molecules such as dietary proteins and amino acids display anti-inflammatory, anti-oxidation, anti-proliferative and anti-cancer properties; such molecules therefore represent novel candidate drugs for future clinical trials [1]. Specifically, maize peptides, mung bean peptides and soybean peptides have been shown to induce cancer cell apoptosis, autophagy or cell cycle arrest [10]. However, the anti-cancer properties of HP in the context of liver cancer are poorly understood.

Here, we investigate the effect of protein hydrolysate HP on liver cancer cells; we measure the impact of HP treatment on liver cancer cell viability, migration, mitochondrial membrane potential and reactive oxygen species (ROS) levels, making use of the Hep3B human liver cancer cell line. We determine the impact of HP treatment on cellular signaling pathways, including classical GSK-3β/β-catenin signaling. Our findings improve upon the current understanding of the anti-cancer properties of HP as novel candidate anti-cancer molecules.

2. Materials and Methods

Preparation of hemp peptides Defatted hemp seed meal was obtained from Liaoning Qiaopai Biotech Co.,Ltd. (China, Shenyang). 20% (w/v, protein basis) aqueous hemp seed protein isolate were soaked in neutral protease (3%w/v, protein basis) and papain (0.4%w/v, protein basis) at pH 5.0 at 70℃ for 3 hours, heated to 95℃ for 15 min and centrifuged at 10,000g for 15 min at 4℃. The supernatant was discarded to obtain hemp protein powder [37], which was then hydrolyzed to produce hemp protein hydrolysates [15].

Ultrafiltration Hemp protein hydrolysates were separated into a low molecular weight fraction by ultrafiltration using the Pellicon®2 Mini Cassette (Membrane NMWCO: 1 Ku; EMD Millipore Co., Billerica, MA, USA). Soluble peptides were collected using a < 1 Ku membrane. Small molecule peptides were freeze-dried and stored at -20℃ prior to use.

Cells culture Hep3B liver cancer and L02 normal hepatocyte cell lines were cultured in Dulbecco's Modified Eagle's medium (DMEM) (Invitrogen, Carlsbad, CA, USA); medium was supplemented with 10% fetal bovine serum (FBS, Hyclone, Logan, UT, USA), penicillin (100 U/ml)

and streptomycin (100 mg/ml) (P/S) (Solarbio life sciences, Beijing, P.R. China); cells were incubated at 37°C with 5% CO_2.

Cell Viability Assay. Cell viability was assessed by MTT colorimetric assay [3-(4,5-dimethylthiazol-2-yl)-2,5 -diphenyltetrazolium bromide, Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA]. Hep3B and L02 cells were seeded in 96-well plates at 4×10^3 cells/well and treated with HP (0, 0.5, 1, 2, 5 and 10 mg/ml) for 24 h. Following treatment, cells were incubated with 10 µl (0.5mg/ml) of MTT at 37°C in 5% CO_2 for two hours. The supernatant was then removed and formazan was solubilized with DMSO. Absorbance was measured at 490 nm using the UV MAX kinetic microplate reader platform (Molecular Devices, LLC, Sunnyvale, CA, USA).

Apoptosis detection with Annexin V-FITC. Apoptosis levels were determined by Annexin V fluorescence assay. Hep3B and L02 cells were seeded in 6-well plates at 2×10^5 cells/well and following 0, 6 and 12 hour incubation with 10 mg/ml HP. Levels of apoptosis were measured using the Annexin V-FITC and PI detection Kit (Solarbio life sciences, Beijing, P.R. China); signal was detected by fluorescence microscopy (EVOS®xl core cell culture microscope, Advanced Microscopy Group, Paisley, Scotland, UK) and flow cytometry (FACSCalibur, BD Biosciences, Franklin Lakes, NJ, USA); data were analyzed using WinMDI version 2.9 (BD Biosciences).

Wound Healing assay. Cell migration was assessed by wound healing assay. Hep3B cells were seeded in 6-well plates at 1×10^6 cells/well. A linear scratch across the cell monolayer was made using small pipette tip. Cells were rinsed three times with PBS prior to addition of HP (0, 2 and 10 mg/ml). Cells were imaged at 0 and 24 hour timepoints using a fluorescence microscopy (EVOS®xl core cell culture microscope, Advanced Microscopy Group, Paisley, Scotland, UK) to assess migration.

Dectection of ROS production. Cellular and mitochondrial ROS levels of cells were determined using DCFH-DA (Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, USA) and MitoSOX (Thermo Fisher Scientific) staining. Hep3B cells were seeded in 6-well plates at 2×10^5 cells/well and treated with 10 mg/ml HP for 0, 6 and 12 hours. Nuclei were visualized under a microscope following 20 min incubation with DAPI stain (Solarbio life sciences, Beijing, P.R. China).

Mitochondrial depolarization assays. Mitochondrial membrane potential was assessed by JC-1 assay (Beyotime, Shanghai, PR China). JC-1 is a membrane-permeable dye that selectively enters mitochondria; change in mitochondrial membrane potential can be detected by the fluorescence transition of aggregates. Hep3B cells were treated with 10 mg/ml HP for 0, 6 and 12 hours prior to incubation with 20 mM JC-1 for 15 mins at 37°C and then washed with PBS. Nuclei were visualized by DAPI (Solarbio life sciences, Beijing, P.R. China) staining. After washing with PBS, cells were imaged using a fluorescence core cell culture microscope (EVOS®xl core cell culture microscope); fluorescence intensity was assessed qualitatively.

Western blotting analysis. Hep3B cells were seeded in 6-well plates at 2×10^5 cells/well and treated with 10 mg/ml HP for 0, 1, 3, 6 and 12 hours. Cell protein lysates were separated on 12% SDS-PAGE (sodium dodecyl sulfate-polyacrylamide gels) and transferred onto nitrocellulose membranes (Millipore, Bedford, MA, USA). Membranes were blotted with primary antibodies against caspase-3 (Cell Signaling Technology, Beverly, MA, USA, #9661), Bad (Cell Signaling Technology, #9268), Bcl-2 (Cell Signaling Technology, #15071), Akt (Cell Signaling Technology, #2920), p-Akt (Cell Signaling Technology, #4060), Gsk-3β (Beyotime, Shanghai, PR China, #AG751), p-Gsk-3β (Beyotime, Shanghai, PR China, #AG753), β-catenin (Beyotime, Shanghai, PR China, #AC106), p-β-catenin (Bioss, Beijing, P.R. China, #bs-3085) and β-actin (Cell Signaling Technology, #3700) (dilution 1:2,000) at 4°C overnight. Membranes were washed five times with tris buffered saline containing Tween-20 (TBST) (10 mM Tris HCl (pH 7.5), 150 mM NaCl and 0.2% Tween-20) and were subsequently incubated with Horseradish Peroxidase-conjugated goat anti-rabbit IgG (Sangon Biotech, Shanghai, PR China) or anti-mouse IgG (Sangon Biotech) for 1 h at room temperature (RT). After the removal of excess antibodies by washing with TBST, signal detection was performed using chemiluminescence (GE Healthcare Life Sciences, Chalfont, UK) according to the manufacturer's instructions.

Statistical analysis. Data from at least three independent experiments were described as the means ± standard deviation (SD). Repeated measures analysis of variance (ANOVA) was used to analyze changes across time and differences between groups in each experiment. Unpaired two-tailed Student t-test was used to determine statistical significance between groups. P<0.05 was considered statistically significant （*, P<0.05; **, P<0.01; ***, P<0.001).

Result

Hemp peptides preparation and identification

Hemp protein underwent hydrolysis by papain and neutral protease, yielding HP. Assessment of molecular weight distribution by MALDI-TOF/TOF mass spectrometry indicated a distribution range of 170-900 ku. The bulk of peptides were <400 ku (Fig. 1), indicating the obtained HP mainly comprise 2-3 amino acid residues. It has been reported that short oligopeptides, especially dipeptides or tripeptides, are easily absorbed and utilized by the human body [31]; these low molecular weight HP therefore represent those most likely to be absorbed and exert their biological activity.

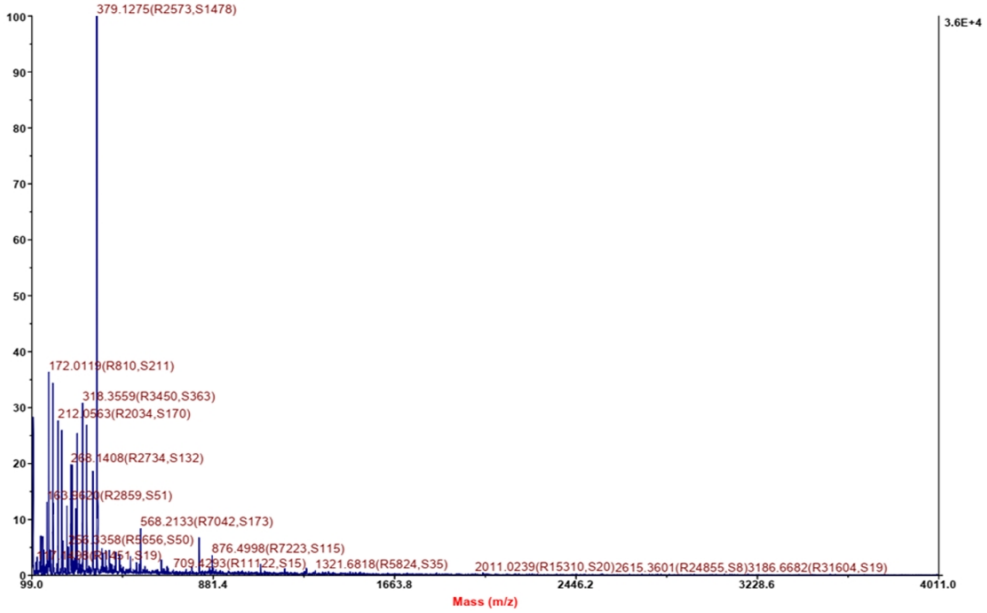


Figure 1 — Molecular weight (M.W.) distribution of hemp peptides estimated by MALDI-TOF/TOF mass spectrometry

Effect of hemp peptides on apoptosis and migration in Hep3B liver cancer cells.

Hep3B liver cancer cells and comparator L02 normal liver cells were treated with varying HP concentrations for 24 hours. The cellular viability and proliferation (using 1% and 10% FBS, respectively) were measured by MTT assay. HP treatment effectively reduced both cellular viability and proliferation in Hep3B cancer cells, while the L02 normal liver cell line was not affected (Fig.2 A and B): 10mg/ml HP induced cell death in >50% of Hep3B cells after 24 hours of exposure. HP treatment lead to a significant time-dependent increase in apoptosis in Hep3B cells (Fig. 2C and 2D), with no effect seen in the L02 comparator cells, suggesting selective cytotoxicity. HP treatment also significantly inhibited Hep3B cell migration in a concentration-dependent manner as determined by wound healing assay (Fig. 2E).

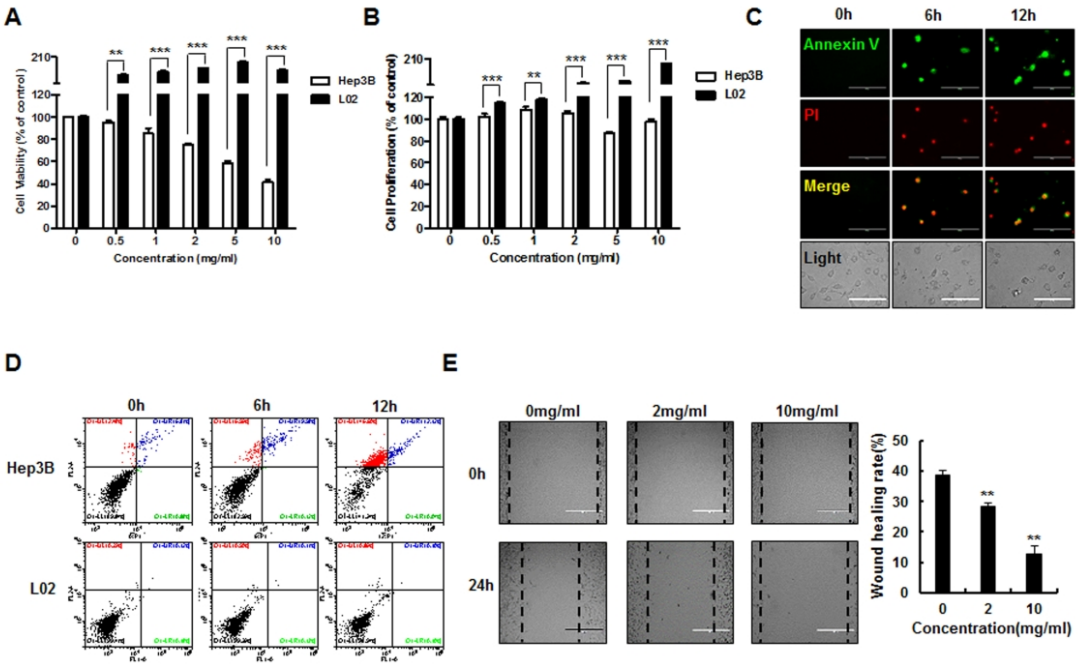


Figure 2 – Effect of hemp peptides on cell viablilty, cell prolifation, apoptosis and cell migration in Hep3B cells

Hep3B and L02 cells were treated with HP (0, 0.5, 1, 2, 5 and 10 mg/ml) for 24 hours. (A) Cell viability and (B) cell proliferation were measured by MTT colorimetric assay. (C). Hep3B cells were treated with 10 mg/ml HP for 0, 6 12 hours. Apoptosis was assessed by Annexin V-FITC(green) / PI (red) fluorescence microscopy. (D). Hep3B cells and L02 cells were treated with 10 mg/ml HP for 0, 6 and 12 hours. Rate of apoptosis was analyzed by flow cytometry. (E). Hep3B cell migration assessed by wound healing assay after treatment with 0, 2 and 10 mg/ml hemp peptides (left panel); healing rate is shown together after hemp peptide treatment (right panel). Scale bars represent 100 μm; values are given as the mean of at least three independent experiments ±SEM (**$p < 0.01$, ***$p < 0.001$).

Cellular ROS levels plays major roles in HP induced liver cancer cell apoptosis

Changes to intracellular and mitochondrial ROS levels were determined by DCFH-DA/DAPI and MitoSOX/DAPI fluorescence imaging. Treatment of Hep3B cells with HP resulted in increased intracellular and mitochondrial ROS levels over time (Fig. 3A and 3B). HP also significantly increased MMP as determined by JC-1 assay (Fig. 3C). Pre-treatment of Hep3B cells with 5mM N-Acetylcysteine (NAC) for 30 mins decreased HP-induced ROS and MMP elevation (Fig. 3D-F) and decreased HP-induced effects on migration and apoptosis (Fig. 3G and 3H).

Hep3B cells were treated with 10 mg/ml hemp peptides for 0, 6 and 12 hours. (A). Cellular reactive oxygen species (ROS) levels were detected by DCFH-DA (green) and DAPI (blue) staining. (B). Mitochondiral ROS levels were measured by fluorescence microscopy using MitoSOX (red) and DAPI (blue) staining. (C). Mitochondrial membrane potential (MMP) was detected by JC-1 assay.Hep3B cells were pre-treatment with 5mM NAC for 30 mins prior to 10 mg/ml hemp peptide treatment for 12 hours. (D). Cellular ROS levels determined by DCFH-DA (green) and DAPI (blue) staining. (E). ROSs level at the mitochondria were measured by fluorescence microscopy using MitoSOX (red) and DAPI (blue) staining. (F). Mitochondrial membrane potential detected by JC-1 assay. (G). Cell migration determined by wound healing assay. (H). Apoptosis levels determined by fluorescence microscopy of Annexin V-FITC (green) and PI (red). Scale bars represent 100 μm for all images.

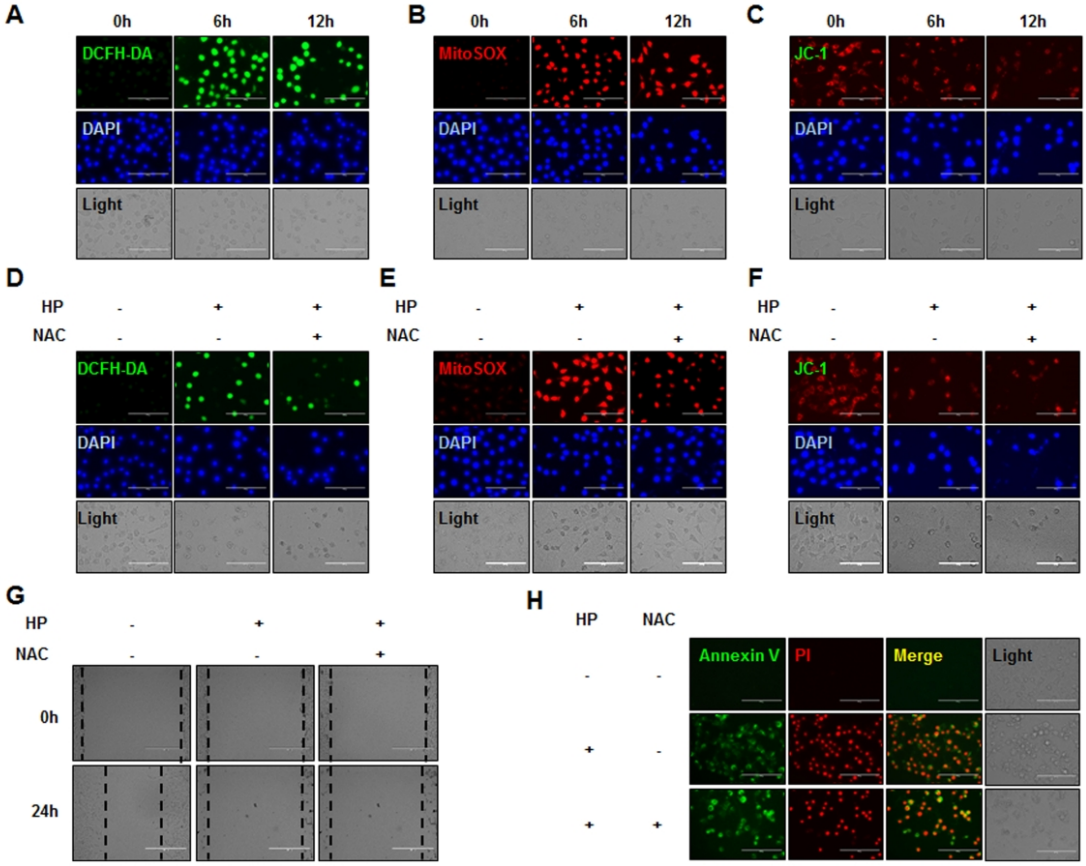


Figure 3 – Effect of hemp peptides on cellular and mitochondrial reactive oxygen species and mitochondrial membrane permeability in Hep3B cells

HP induces apoptosis through mitochondria dependent and Akt/GSK3β/β-catenin signaling pathways in Hep3B cells.

Caspases and Bcl-2 protein family members were investigated by western blot as key players in mitochondrial-dependent cell death pathways. HP-treated Hep3B cells demonstrated upregulation of pro-apoptotic Bad and cleaved caspase 3, while the anti-apoptotic protein Bcl-2 was down-regulated (Figure 4A). HP treatment also induced a significant reduction in Akt phosphorylation, while GSK-3β and β-catenin phosphorylation was increased (Fig.4 B).

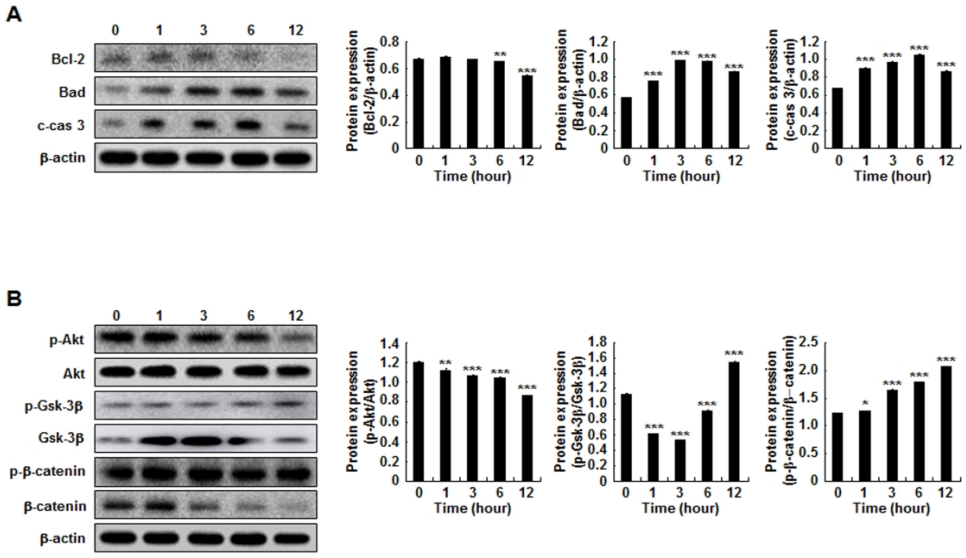


Figure 4 – Effect of hemp peptides on apotosis, apoptosis-related proteins expression and Akt/GSK3β/β-catenin signaling in Hep3B cells

Western blots of cell lysates following treatment with 10 mg/ml hemp peptides. (A) Pro-apoptotic proteins Bad and cleaved-caspase 3 (c-cas 3) alongside anti-apoptotic Bcl-2. (B) p-AKT, AKT, p-Gsk-3β Gsk-3β, p-β-catenin and β-catenin protein levels in Hep3B cells. β-actin was used as a loading control. Data are presented as the mean of three samples ±SEM (*p<0.05, **p<0.01, ***p<0.001).

Discussion

Protein hydrolysates have become the focus of substantial research interest due to their therapeutic properties in multiple disease settings, including inflammatory and metabolic diseases. Such hydrolysates have also demonstrated anti-cancer properties. 1 ku molecular weight donkey serum albumin peptides, produced by hydrolysis, have been demonstrated to inhibited cell proliferation in human leukemia, liver cancer and breast cancer cells, suggesting these molecules may be of therapeutic interest in the context of cancer treatment. It has also been reported that cannabis sativa L.ethanolic extract can be useful as a treatment for skin inflammation [31], and that cannabinoids can induce apoptosis in pancreatic cancer [8] and breast cancer [40] cells through endoplasmic stress and ROS elevation. Hemp extract has been shown to inhibit the proliferation and growth of prostate cancer [11] and melanoma [5] cells, and hemp derivatives are able to alter mitochondrial permeability of rat liver cells and increase cytochrome c release [48], suggesting that hemp peptides represent candidate anti-cancer agents. It has also been reported that the biological activities of peptides are modulated by molecular weight, with low molecular weight correlating with increased activity [13].

In this study, we investigate the potential anti-cancer properties of small molecular weight HP produced from hemp seed meal. Anti-cancer agents frequently act via induced of apoptosis in cancer cells, and this has been demonstrated as an important mechanism bv which other peptide types exert anti-cancer activity; rapeseed protein source peptide has been shown to induce apoptosis in HUVEC cells via downregulatopm of Bcl-2 and increased cleaved caspase-3 and Bax expression [46]. We demonstrate that HP treatment induces apoptosis in Hep3B liver cancer cells, while L02 cells – a cell line representing normal liver cells – are unaffected. We identify increased Bad and cleaved-caspase-3 following HP treatment, with a corresponding decrease in anti-apoptotic Bcl-2 expression. These data provide preliminary biological mechanisms by which HP induced apoptosis in Hep3B cells.

Cellular ROS levels are an important determinant of cell proliferation, survival, angiogenesis and metastasis in cancer cells [21-22]. Abnormal accumulating of ROS leads to the changes in MMP, endoplasmic reticulum stress, membrane lipid peroxidation, protein denaturation and DNA damage, resulting in decreased cell viability [26]. Similarly, ROS levels can modulate cancer cell migration, including via intracellular ROS changes in response to cancer treatment [28]. We demonstrate that HP treatment significantly increases cellular ROS levels, and correlate this with reduce migration and colony formation in Hep3B cells. Moreover, scavenging of ROS with NAC pre-treatment rescues the phenotypes we observe in response to HP, strongly suggesting increased ROS levels act as a major mechanism by which HP exerts anti-cancer activity.

The Wnt/β-catenin signaling pathway regulates a large number of cellular activities, including proliferation, differentiation, migration and cell apoptosis [35]. Aberrant Wnt/β-catenin activation has been identified as a driver event in a number of cancer types; accumulation of cytoplasmic β-catenin and subsequent entry into the nucleus leads to activation of the TCF/LEF transcriptional program, promoting cell survival [9]. Previous studies have shown that knowdown of SOX9 in human lung carcinoma cells induces apoptosis via decreased p-Wnt and β-catenin expression [17] and that β-catenin is a pivotal target for glioma and ovarian cancer therapy [2]. It has also been reported that prodigiosin inhibits the phosphorylation of GSK-3β, restraining β-catenin-mediated Wnt activation and subsequent transcriptional activation of pro-survival genes, such as cyclin D1, slowing tumor progression in a breast cancer tumor model mice [44]. Phosphorylated Akt has the ability to phosphorylate GSK-3β as a key molecule in this process, which in turn inhibits cell survival via β-catenin phosphorylation and induction of apoptosis [27]. The β-catenin pathway is abnormally activated in liver cancer and has been implicated in tumor formation, progression, metastasis and drug resistance [43]. A large number of anti-cancer agents targeted at β-catenin have been developed, but

few have entered clinical trials [34]. We demonstrate that HP treatment leads to inactivation of the Akt/GSK3β/β-catenin signaling pathway via AKT phosphorylation, GSK-3β inactivation and subsequent phosphorylation and degradation of β-catenin.

Together, these data demonstrate that HP from hemp seed protein hydrolysates display anti-cancer properties. Increase in cellular ROS levels represents a crucial mechanism by which HP exerts its anti-proliferative and pro-apoptotic activity and HP treatment modulates activity of the Akt/GSK/β-catenin signaling pathway. Our findings suggest that HP represents a promising anti-cancer therapy in the context of liver cancer; further investigation of the anti-cancer properties of foodborne protein hydrolysates is warranted.

Conflict of interest

The authors declare no conflicts of interest.

Author Contributions:

Data curation: Lian-Hui Wei, Yan Dong, Yu-Feng Sun, Xue-Song Mei and Xue-Song Ma; Formal analysis: Jie Shi, Qing-li Yang, Hu-Nan Sun, Yan-Ru Ji and Zheng-Hai Zhang; Funding acquisition: Shu-Min Song; Supervision: Lian-HuiWei and Shu-Min Song.

Acknowledgments:

This research was supported by the Heilongjiang Academy of Sciences Foundation Project (KY2023DQ02), China.

Funding:

This research was supported by the Heilongjiang Academy of Sciences Foundation Project (KY2023DQ02), China.

REFERENCES

1. Anwanwan, D., Singh, S. K., Singh, S., Saikam, V., & Singh, R. (2020). Challenges in liver cancer and possible treatment approaches. Biochim Biophys Acta Rev Cancer, 1873(1), 188314. doi:10.1016/j.bbcan.2019.188314

2. Arend, R. C., Londoño-Joshi, A. I., Straughn, J. M., Jr., & Buchsbaum, D. J. (2013). The Wnt/β-catenin pathway in ovarian cancer: a review. Gynecol Oncol, 131(3), 772-779. doi:10.1016/j.ygyno.2013.09.034

3. Asaduzzaman, M., Uddin, M. J., Kader, M. A., Alam, A. H., Rahman, A. A., Rashid, M., Sadik, G. (2014). In vitro acetylcholinesterase inhibitory activity and the antioxidant properties of Aegle marmelos leaf extract: implications for the treatment of Alzheimer's disease. Psychogeriatrics, 14(1), 1-10. doi:10.1111/psyg.12031

4. Atalay, S., Jarocka-Karpowicz, I., & Skrzydlewska, E. (2019). Antioxidative and Anti-Inflammatory Properties of Cannabidiol. Antioxidants (Basel), 9(1). doi:10.3390/antiox9010021

5. Blázquez, C., Carracedo, A., Barrado, L., Real, P. J., Fernández-Luna, J. L., Velasco, G., Guzmán, M. (2006). Cannabinoid receptors as novel targets for the treatment of melanoma. Faseb j, 20(14), 2633-2635. doi:10.1096/fj.06-6638fje

6. Bonini, S. A., Premoli, M., Tambaro, S., Kumar, A., Maccarinelli, G., Memo, M., & Mastinu, A. (2018). Cannabis sativa: A comprehensive ethnopharmacological review of a medicinal plant with a long history. J Ethnopharmacol, 227, 300-315. doi:10.1016/j.jep.2018.09.004

7. Bruix, J., Reig, M., & Sherman, M. (2016). Evidence-Based Diagnosis, Staging, and Treatment of Patients With Hepatocellular Carcinoma. Gastroenterology, 150(4), 835-853. doi:10.1053/j.gastro.2015.12.041

8. Carracedo, A., Gironella, M., Lorente, M., Garcia, S., Guzmán, M., Velasco, G., & Iovanna, J. L. (2006). Cannabinoids induce apoptosis of pancreatic tumor cells via endoplasmic reticulum stress-related genes. Cancer Res, 66(13), 6748-6755. doi:10.1158/0008-5472.Can-06-0169

9. Daneman, R., Agalliu, D., Zhou, L., Kuhnert, F., Kuo, C. J., & Barres, B. A. (2009). Wnt/beta-catenin signaling is required for CNS, but not non-CNS, angiogenesis. Proc Natl Acad Sci U S A, 106(2), 641-646. doi:10.1073/pnas.0805165106

10. de Mejia, E. G., & Dia, V. P. (2010). The role of nutraceutical proteins and peptides in apoptosis, angiogenesis, and metastasis of cancer cells. Cancer Metastasis Rev, 29(3), 511-528. doi:10.1007/s10555-010-9241-4

11. De Petrocellis, L., Ligresti, A., Schiano Moriello, A., Iappelli, M., Verde, R., Stott, C. G., Di Marzo, V. (2013). Non-THC cannabinoids inhibit prostate carcinoma growth in vitro and in vivo: pro-apoptotic effects and underlying mechanisms. Br J Pharmacol, 168(1), 79-102. doi:10.1111/j.1476-5381.2012.02027.x

12. Dia, V. P., & Mejia, E. G. (2010). Lunasin promotes apoptosis in human colon cancer cells by mitochondrial pathway activation and induction of nuclear clusterin expression. Cancer Lett, 295(1), 44-53. doi:10.1016/j.canlet.2010.02.010

13. Dugnol, J., & Riera, F. A. (2016). Hyperimmunised bovine milk and whey: influence of pH and enzymatic treatments on the antigen-binding capacity of immunoglobulin G. J Sci Food Agric, 96(5), 1814-1820. doi:10.1002/jsfa.7291

14. ElSohly, M. A., Radwan, M. M., Gul, W., Chandra, S., & Galal, A. (2017). Phytochemistry of Cannabis sativa L. Prog Chem Org Nat Prod, 103, 1-36. doi:10.1007/978-3-319-45541-9_1

15. Gabotti, D., Locatelli, F., Cusano, E., Baldoni, E., Genga, A., Pucci, L., Mattana, M. (2019). Cell Suspensions of Cannabis sativa (var. Futura): Effect of Elicitation on Metabolite Content and Antioxidant Activity. Molecules, 24(22). doi:10.3390/molecules24224056

16. Grof, C. P. L. (2018). Cannabis, from plant to pill. Br J Clin Pharmacol, 84(11), 2463-2467. doi:10.1111/bcp.13618

17. Guo, Y. Z., Xie, X. L., Fu, J., & Xing, G. L. (2018). SOX9 regulated proliferation and apoptosis of human lung carcinoma cells by the Wnt/β-catenin signaling pathway. Eur Rev Med Pharmacol Sci, 22(15), 4898-4907. doi:10.26355/eurrev_201808_15626

18. He, L., Zhou, H., Zeng, Z., Yao, H., Jiang, W., & Qu, H. (2019). Wnt/β-catenin signaling cascade: A promising target for glioma therapy. J Cell Physiol, 234(3), 2217-2228. doi:10.1002/jcp.27186

19. Hernández-Ledesma, B., Hsieh, C. C., & de Lumen, B. O. (2013). Chemopreventive properties of Peptide Lunasin: a review. Protein Pept Lett, 20(4), 424-432.

20. Jian, F., Divagar, D., Mhaiki, J., Jayas, D. S., Fields, P. G., & White, N. D. G. (2018). Static and dynamic methods to determine adsorption isotherms of hemp seed (Cannabis sativa L.) with different percentages of dockage. Food Science & Nutrition, 6(6), 1629-1640. doi:10.1002/fsn3.744

21. Khan, M., Maryam, A., Qazi, J. I., & Ma, T. (2015). Targeting Apoptosis and Multiple Signaling Pathways with Icariside II in Cancer Cells. Int J Biol Sci, 11(9), 1100-1112. doi:10.7150/ijbs.11595

22. Khan, M., Maryam, A., Zhang, H., Mehmood, T., & Ma, T. (2016). Killing cancer with platycodin D through multiple mechanisms. J Cell Mol Med, 20(3), 389-402. doi:10.1111/jcmm.12749

23. Li, C. C., Lee, Y. C., Lo, H. Y., Huang, Y. W., Hsiang, C. Y., & Ho, T. Y. (2019). Antihypertensive Effects of Corn Silk Extract and Its Novel Bioactive Constituent in Spontaneously Hypertensive Rats: The Involvement of Angiotensin-Converting Enzyme Inhibition. Molecules, 24(10). doi:10.3390/molecules24101886

24. Li, Y. L., Dai, X. R., Yue, X., Gao, X. Q., & Zhang, X. S. (2014). Identification of small secreted peptides (SSPs) in maize and expression analysis of partial SSP genes in reproductive tissues. Planta, 240(4), 713-728. doi:10.1007/s00425-014-2123-1

25. Lin, C. L., Chien, R. N., Yeh, C., Hsu, C. W., Chang, M. L., Chen, Y. C., & Yeh, C. T. (2014). Significant renoprotective effect of telbivudine during preemptive antiviral therapy in advanced liver cancer patients receiving cisplatin-based chemotherapy: a case-control study. Scand J Gastroenterol, 49(12), 1456-1464. doi:10.3109/00365521.2014.962604

26. Liu, H., Liao, W., Fan, L., Zheng, Z., Liu, D., Zhang, Q. W., Liu, F. (2020). Ethanol extract of Ophiorrhiza pumila suppresses liver cancer cell proliferation and migration. Chin Med, 15, 11. doi:10.1186/s13020-020-0291-4

27. Liu, Y., Huang, Y., Ding, J., Liu, N., Peng, S., Wang, J., Zhang, Y. (2019). Targeting Akt by SC66 triggers GSK-3β mediated apoptosis in colon cancer therapy. Cancer Cell Int, 19, 124. doi:10.1186/s12935-019-0837-7

28. Malfettone, A., Soukupova, J., Bertran, E., Crosas-Molist, E., Lastra, R., Fernando, J., Fabregat, I. (2017). Transforming growth factor-β-induced plasticity causes a migratory stemness phenotype in hepatocellular carcinoma. Cancer Lett, 392, 39-50. doi:10.1016/j.canlet.2017.01.037

29. Malomo, S. A., He, R., & Aluko, R. E. (2014). Structural and functional properties of hemp seed protein products. J Food Sci, 79(8), C1512-1521. doi:10.1111/1750-3841.12537

30. McConnell, E. J., Devapatla, B., Yaddanapudi, K., & Davis, K. R. (2015). The soybean-derived peptide lunasin inhibits non-small cell lung cancer cell proliferation by suppressing phosphorylation of the retinoblastoma protein. Oncotarget, 6(7), 4649-4662. doi:10.18632/oncotarget.3080

31. McGraw, N. J., Napawan, N., Toland, M. R., Schulze, J., Tulk, B. M., & Krul, E. S. (2014). Partially hydrolyzed soy protein shows enhanced transport of amino acids compared to nonhydrolyzed protein across an intestinal epithelial cell monolayer. J Food Sci, 79(9), H1832-1840. doi:10.1111/1750-3841.12553

32. Mechoulam, R., & Gaoni, Y. (1967). The absolute configuration of delta-1-tetrahydrocannabinol, the major active constituent of hashish. Tetrahedron Lett, 12, 1109-1111. doi:10.1016/s0040-4039(00)90646-4

33. Najafipour, H., & Beik, A. (2016). The Impact of Opium Consumption on Blood Glucose, Serum Lipids and Blood Pressure, and Related Mechanisms. Front Physiol, 7, 436. doi:10.3389/fphys.2016.00436

34. Nambotin, S. B., Lefrancois, L., Sainsily, X., Berthillon, P., Kim, M., Wands, J. R., . . . Merle, P. (2011). Pharmacological inhibition of Frizzled-7 displays anti-tumor properties in hepatocellular carcinoma. J Hepatol, 54(2), 288-299. doi:10.1016/j.jhep.2010.06.033

35. Nusse, R., & Clevers, H. (2017). Wnt/β-Catenin Signaling, Disease, and Emerging Therapeutic Modalities. Cell, 169(6), 985-999. doi:10.1016/j.cell.2017.05.016

36. Orio, L. P., Boschin, G., Recca, T., Morelli, C. F., Ragona, L., Francescato, P., Speranza, G. (2017). New ACE-Inhibitory Peptides from Hemp Seed (Cannabis sativa L.) Proteins. J Agric Food Chem, 65(48), 10482-10488. doi:10.1021/acs.jafc.7b04522

37. Pap, N., Hamberg, L., Pihlava, J. M., Hellström, J., Mattila, P., Eurola, M., & Pihlanto, A. (2020). Impact of enzymatic hydrolysis on the nutrients, phytochemicals and sensory properties of oil hemp seed cake (Cannabis sativa L. FINOLA variety). Food Chem, 320, 126530. doi:10.1016/j.foodchem.2020.126530

38. Potter, D. J. (2014). A review of the cultivation and processing of cannabis (Cannabis sativa L.) for production of prescription medicines in the UK. Drug Test Anal, 6(1-2), 31-38. doi:10.1002/dta.1531

39. Qin, Y., Lu, Y., Wang, R., Li, W., & Qu, X. (2013). SL1122-37, a novel derivative of sorafenib, has greater effects than sorafenib on the inhibition of human hepatocellular carcinoma (HCC) growth and prevention of angiogenesis. Biosci Trends, 7(5), 237-244.

40. Shrivastava, A., Kuzontkoski, P. M., Groopman, J. E., & Prasad, A. (2011). Cannabidiol induces programmed cell death in breast cancer cells by coordinating the cross-talk between apoptosis and autophagy. Mol Cancer Ther, 10(7), 1161-1172. doi:10.1158/1535-7163.Mct-10-1100

41. Soucek, J., Skvor, J., Poucková, P., Matousek, J., Slavík, T., & Matousek, J. (2006). Mung bean sprout (Phaseolus aureus) nuclease and its biological and antitumor effects. Neoplasma, 53(5), 402-409.

42. Teh, S. S., Bekhit, A. E. A., Carne, A., & Birch, J. (2016). Antioxidant and ACE-inhibitory activities of hemp (Cannabis sativa L.) protein hydrolysates produced by the proteases

AFP, HT, Pro-G, actinidin and zingibain. Food Chem, 203, 199-206. doi:10.1016/j.foodchem.2016.02.057

43. Vilchez, V., Turcios, L., Marti, F., & Gedaly, R. (2016). Targeting Wnt/β-catenin pathway in hepatocellular carcinoma treatment. World J Gastroenterol, 22(2), 823-832. doi:10.3748/wjg.v22.i2.823

44. Wang, Z., Li, B., Zhou, L., Yu, S., Su, Z., Song, J., Lu, D. (2016). Prodigiosin inhibits Wnt/β-catenin signaling and exerts anticancer activity in breast cancer cells. Proc Natl Acad Sci U S A, 113(46), 13150-13155. doi:10.1073/pnas.1616336113

45. Wei, W., Chua, M. S., Grepper, S., & So, S. K. (2011). Soluble Frizzled-7 receptor inhibits Wnt signaling and sensitizes hepatocellular carcinoma cells towards doxorubicin. Mol Cancer, 10, 16. doi:10.1186/1476-4598-10-16

46. Xu, F., Zhang, J., Wang, Z., Yao, Y., Atungulu, G. G., Ju, X., & Wang, L. (2018). Absorption and Metabolism of Peptide WDHHAPQLR Derived from Rapeseed Protein and Inhibition of HUVEC Apoptosis under Oxidative Stress. J Agric Food Chem, 66(20), 5178-5189. doi:10.1021/acs.jafc.8b01620

47. Yan, X., Tang, J., dos Santos Passos, C., Nurisso, A., Simões-Pires, C. A., Ji, M., Fan, P. (2015). Characterization of Lignanamides from Hemp (Cannabis sativa L.) Seed and Their Antioxidant and Acetylcholinesterase Inhibitory Activities. J Agric Food Chem, 63(49), 10611-10619. doi:10.1021/acs.jafc.5b05282

48. Zaccagnino, P., D'Oria, S., Romano, L. L., Di Venere, A., Sardanelli, A. M., & Lorusso, M. (2012). The endocannabinoid 2-arachidonoylglicerol decreases calcium induced cytochrome c release from liver mitochondria. J Bioenerg Biomembr, 44(2), 273-280. doi:10.1007/s10863-012-9431-6

49. Zanoni, C., Aiello, G., Arnoldi, A., & Lammi, C. (2017). Hempseed Peptides Exert Hypocholesterolemic Effects with a Statin-Like Mechanism. J Agric Food Chem, 65(40), 8829-8838. doi:10.1021/acs.jafc.7b02742

50. Zengin, G., Menghini, L., Di Sotto, A., Mancinelli, R., Sisto, F., Carradori, S., Grande, R. (2018). Chromatographic Analyses, In Vitro Biological Activities, and Cytotoxicity of Cannabis sativa L. Essential Oil: A Multidisciplinary Study. Molecules, 23(12). doi:10.3390/molecules23123266

51. Zhou, Y., Li, Y., Zhou, T., Zheng, J., Li, S., & Li, H. B. (2016). Dietary Natural Products for Prevention and Treatment of Liver Cancer. Nutrients, 8(3), 156. doi:10.3390/nu8030156

УДК 547.458.88 DOI: 10.37816/eeste-2024-1-304-307

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЫКВЕННОГО ПЕКТИНА И ЕГО КОМПЛЕКСА С КАТИОНАМИ МЕДИ
STUDY OF PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF PUMPKIN PECTIN AND ITS COMPLEX WITH COPPER IONS

Элмаддин Исаевич Мамедов, Елена Николаевна Калмыкова
Elmaddin I. Mamedov, Elena N. Kalmykova

Липецкий государственный технический университет, Россия, Липецк
Lipetsk State Technical University, Russia, Lipetsk
(e-mail: elik.mam@mail.ru, veter1407@rambler.ru)

Аннотация: В работе представлены результаты исследования физико-химических свойств (кинематической вязкости и молекулярной массы) нативного тыквенного пектина и металлокомпозитных материалов, синтезированных на его основе с катионами двухвалентного металла (Cu^{2+}).

Abstract: The paper presents the results of a study of the physicochemical properties (kinematic viscosity and molecular weight) of native pumpkin pectin and metal composite materials synthesized on its basis with divalent metal cations (Cu^{2+}).

Ключевые слова: пектин, металлокомплекс, вискозиметрия, кинематическая вязкость, молекулярная масса.

Keywords: pectin, metal complex, viscometry, kinematic viscosity, molecular weight.

Известно, что пектины являются эффективными биосорбентами, способными очищать организм от радионуклидов, различных метаболитов, включая глюкозу и холестерин, токсикантов и прочих низкомолекулярных биологически активных веществ (БАВ). Наряду с указанными характеристиками этому классу биополимеров свойственно проявление противоязвенной, ранозаживляющей, иммуномодулирующей, антиоксидантной и противомикробной активности [1-3].

Среди традиционных растений для получения пектина можно выделить следующие – яблочные и цитрусовые выжимки, свекловичный жом, корзинки подсолнечника и др. Тыква является перспективным источником пектина с такими характеристиками, как высокая степень этерификации и разветвленности макромолекулы. В работах [4, 5] авторы сообщают об антидиабетической, иммуномодулирующей, противокашлевой и антиоксидантной активности пектиновых фракций, полученных из различных видов тыквы.

За последние 20 лет получение металлокомплексов на основе пектинов привлекает внимание российских и зарубежных ученых. Основные области исследований направлены на поиск новых путей синтеза; изучение физико-химических и биологических свойств. К настоящему времени установлено, что комплексообразование повышает терапевтическую активность лигандов, снижает их токсичность. Кроме того, авторы отмечают, что терапевтический эффект комплексов (например, иммунологическая активность, детоксицирующее и радиозащитное действие) значительно выше по сравнению с исходным пектином. В работах [6, 7] приводятся результаты серии исследований, посвященных изучению комплексообразования пектиновых полисахаридов с макро- и микроэлементами (Fe^{2+}, Co^{2+}, Cu^{2+}, Ca^{2+}, Zn^{2+} и Mn^{2+}) с целью получения новых водорастворимых форм, обладающих различными физиологическими свойствами.

Объектом исследования являлся сельскохозяйственный продукт – крупноплодная тыква сорта «Мичуринская» (лат. *Cucurbita* – род травянистых растений семейства Тыквенные), выращенная в 2022 году на базе научно-образовательного центра Тамбовского государственного технического университета – Мичуринского государственного аграрного университета «Экотехнологии имени Ю. Г. Скрипникова».

Извлечение пектинового полисахарида. Навеску тыквы (63,32 г) помещали в стеклянную колбу объемом 1,5 л и добавляли водный раствор оксалат аммония (0,7%) 500 мл. Емкость оставляли в термостате при температуре 60ºС на 4 часа при периодическом перемешивании через 30 минут. Полученный экстракт с осадком охлаждали до комнатной температуры и фильтровали через плотный вискозный фильтр с использованием воронки Бюхнера для удаления растительных клеток и хранили в холодильнике при температуре 4 ºС. Концентрирование экстрактов до ¼ объема осуществляли на роторном испарителе под вакуумом (давлении 9 мм. рт. ст.) при температуре 60 ºС. Из полученного концентрированного раствора полисахарид осаждали добавлением трехкратного объема этилового спирта. При этом наблюдали выпадение осадка, представляющего собой пектиновый гликан. Отделение полисахаридов от этанольных экстрактов осуществляли седиментацией с последующим фильтрованием пектина через синтетический тканевый фильтр. Полученный полисахарид высушивали при комнатной температуре до постоянной массы.

Синтез пектиновых металлокомплексов осуществляли по методике, предложенной авторами в работе [8]. Навеску пектина (3,6895 г) растворяли в 100 мл воды и перемешивали в течение 2-х часов на магнитной мешалке при температуре 55-60 °С. Далее в перемешиваемую суспензию добавляли 0,1 н. раствор NaOH до pH=9 и перемешивали 2 часа для получения пектата натрия. Затем добавляли водный раствор соли двухвалентного металла ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$) с концентрацией 0,015 моль/л и оставляли перемешивать 30 минут. Далее целевой продукт осаждали двукратным объемом этанола, центрифугировали и сушили.

Для измерения вязкости использовали вискозиметр Уббелоде с диаметром капилляра 0,54 мм. Заполняли капилляр и верхний шарик вискозиметра, доводя до соответствующей метки. Измеряли время понижения уровня раствора в трубке (время истечения), заключенного между двумя метками. Измерения проводили 3 раза. Расчеты кинематической вязкости и молекулярной массы проводили по формулам, приведенным в работе [9].

Для выделения пектина использовали высушенный до постоянной массы и измельченный порошок мякоти тыквы сорта Мичуринская. Общая схема выделения пектинового полисахарида из тыквы представлена на рисунке 1.



Рисунок 1 — Схема выделения пектина из растительного сырья.

Ранее показано, что наиболее эффективно действующим экстрагентом на различные садовые растения, с целью выделения из них пектинов, является оксалат аммония [10], поэтому его использовали в данной работе. Кроме того, была проведена предварительная оценка влияния различных экстрагентов (вода, лимонная кислота и оксалат аммония) на выход целевого пектина из тыквы и подтверждена целесообразность использования раствора оксалата аммония. Выход полученного пектинового полисахарида из тыквы составил 29%.

При синтезе металлокомплексов учитывались следующие факторы. Ранее было показано [11], что при низкой степени этерификации свободные COOH группы конформационно сближаются, что приводит к повышению линейной плотности заряда макромолекулы и, следовательно, к возрастанию силы взаимодействия с катионами металлов. Наличие эфирных групп препятствует такому сближению, поэтому уменьшает степень включения катионов в пектиновый комплекс. В этой связи авторами был предложен двухстадийный способ получения металлокомплексов, который включал стадию щелочного гидролиза полисахарида для удаления OMe-групп галактуроновых звеньев с последующим образованием пектата натрия.

Важным фактором, который учитывался при синтезе пектиновых металлокомплексов, является температура [8]. Нами было также исследовано влияние температуры в диапазоне 25 ÷ 60 °C на эффективность деэтерификации тыквенного пектина. Методом кислотно-основного титрования подтверждено отсутствие OMe-групп после обработки щелочью при 60 °C. Действие щелочи при комнатной температуре обеспечивает лишь частичную деэтерификацию пектиновой макромолекулы, не превышающую 30%, что, соответственно, приводит к снижению степени включения катионов двухвалентных металлов в полисахаридную цепь, (рисунок 2). Выход металлокомплекса составил 5%.

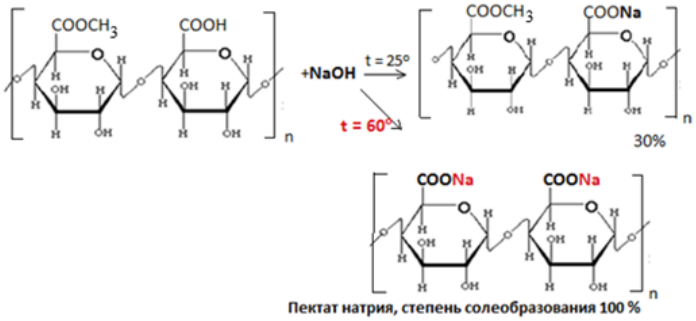


Рисунок 2 — Образование частично или полностью деэтерифицированного пектата натрия.

Известно, что способность пектиновых полисахаридов образовывать гели возрастает с увеличением показателя вязкости и молекулярного веса [12]. Такие характеристики позволяют оценивать качество пектина и прогнозировать область его практического использования.

Для измерения вязкости водного раствора тыквенного пектина использовали вискозиметр Оствальда с диаметром капилляра 0,54 мм. Определение молекулярного веса вискозиметрическим методом отличается простотой и удобством, но для него необходимо знание констант уравнения, связывающего вязкость с молекулярным весом. Для растворов высокомолекулярных соединений из всех существующих уравнений зависимости средневесового молекулярного веса от внутренней характеристической вязкости подходит уравнение Куна-Марка, для пектинов по Гликману и Орлову. Экспериментальные данные по определению кинематической вязкости и молекулярной массы показали, что кинематическая вязкость для исходного пектина составила 1,43 мм^2/с, а для комплекса с катионами меди 4,23 мм^2/с; молекулярный вес для исходного пектина 2,5 кДа, для металлокомплекса 11,9 кДа.

Полученные результаты позволяют предположить, что исходный пектин будет перспективен в медицине и фармацевтической промышленности для создания на его основе биосорбентов для выведения из организма низкомолекулярных биологически активных веществ. Благодаря небольшой молекулярной массе нативный пектин может достаточно легко всасываться в желудочно-кишечном тракте, а затем выводиться из организма через почки. Пектиновый комплекс благодаря большей молекулярной массе перспективен для применения в пищевой промышленности как желирующий агент, загуститель, стабилизатор.

Выводы

1. В результаты исследования методом водно-солевой экстракции выделен пектин из тыквы сорта «Мичуринская», выход которого составил 29%.

2. Изучено влияние факторов (степень этерификации и температура), влияющих на синтез пектиновых металлокомплексов с учетом которых получены медные комплексы с максимальным выходом 5%.

3. Установлено, что исходный пектин обладает небольшой молекулярной массой и кинематической вязкостью в отличие от металлокомплекса. Данные результаты открывают возможность применения нативного пектина в качестве биосорбента для выведения из низкомолекулярных биологически активных веществ, а пектиновые металлокомплексы в пищевой промышленности как стабилизатор, загуститель и желирующий агент.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bush P.L. Pectin: Chemical Properties, Uses and Health Benefits. New York: Nova Science Publishers, 2014.

2. Kuzmann E., Garg V., Oliveira A., Klencsár Z., Szentmihályi K., Fodor J., May Z., Homonnay Z. Mössbauer study of the effect of pH on Fe valence in iron-polygalacturonate as a medicine for human anaemia // Radiation Physics and Chemistry. 2015. V. 107. P. 195–198.

3. Lara-Espinoza C., Carvajal-Millán E., Balandrán-Quintana R., López-Franco Y., Rascón-Chu A. Pectin and Pectin-Based Composite Materials: Beyond Food Texture // Molecules. 2018. V. 23. P. 942.

4. Quanhong L., Caili F, Yukui R, Guanghui H, Tongyi C. Effects of protein-bound polysaccharide isolated from pumpkin on insulin in diabetic rats // Plant Foods Hum Nutr. 2005. V. 60. P. 13–16.

5. Nagai M., Sato T., Watanabe H., Saito K., Kawata M., Enei H. Purification and characterization of an extracellular laccase from the edible mushroom Lentinula edodes and decolorization of chemically different dyes // Appl Microbiol Biotechnol. 2003. V. 60. P. 327–335.

6. Minzanova S.T., Mironov V.F., Vyshtakalyuk A.B., Tsepaeva O.V., Mironova L.G., Mindubaev A.Z., Nizameev I.R., Kholin K.V., Milyukov V.A. Complexation of pectin with macro – and microelements. Antianemic activity of Na, Fe and Na, Ca, Fe complexes // Carbohydrate Polymers. 2015. V. 134. P. 524–533.

7. Minzanova S.T., Mironov V.F., Mironova L.G., Nemtarev A.V., Vyshtakalyuk A.B., Kholin K.V., Nizameeva G.R., Milyukov V.A. Synthesis, properties, and antianemic activity of new metal complexes of sodium pectinate with iron and calcium // Russian Chemical Bulletin. 2019. V. 68. P. 48–54.

8. Минзанова С.Т., Архипова Д.М., Хабибуллина А.В., Миронова Л.Г., Волошина А.Д., Сапунова А.С., Кулик Н.В., Милюков В.А., Миронов В.Ф. Получение новых металлокомплексов пектината натрия с ионами кобальта и никеля и их антимикробная активность // Доклады академии наук. 2019. № 5. С. 511–514.

9. Дойникова, А.И. Выделение свекловичного пектина. Получение пектиновых металлокомплексов с ионами железа. Выпускная квалификационная работа бакалавра. Казань: КНИТУ, 2020. 122 с.

10. Шуклова А.С. Разработка технологии получения пектина из растительного сырья *Artemisia Absintium l.*, *Cerasus Vulgaris l.*, *Chelidonium Majus l.* и *Mentha Piperita l.* Выпускная квалификационная работа магистра. Липецк: ЛГТУ, 2020.

11. Миронов В.Ф., Карасева А.Н., Цепаева О. В., Выштакалюк А.Б., Минзанова С.Т., Морозов В.И., Карлин В.В., Юнусов Э.Р., Миндубаев А.З. Некоторые новые аспекты комплексообразования пектиновых полисахаридов с катионами d-металлов // Химия и компьютерное моделирование. Бутлеровские сообщения. 2003. № 3. С.45–50.

12. Краснова, Ю.В. Разработка биотехнологий функциональных продуктов питания на основе пектинсывороточных гелей. Дис. … канд. техн. наук: М.: МГУПП, 2020. 150 с.

УДК 677.027.65 DOI: 10.37816/eeste-2024-1-308-311

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА СУШКИ ТКАНИ СО ВСПЕНЕННЫМ ПОЛИУРЕТАНОВЫМ ПОКРЫТИЕМ
FEATURES OF THE PROCESS OF DRYING TEXTILE MATERIAL WITH FOAMED POLYURETHANE COATING

Юлия Игоревна Марущак, Наталья Николаевна Ясинская, Наталья Викторовна Скобова
Marushchak I. Yulia, Yasinskaya N. Natalya, Skobova V. Natalya

Витебский государственный технологический университет, Беларусь, Витебск
Vitebsk State Technological University, Belarus, Vitebsk
(e-mail: tonk.00@mail.ru, yasinskaynn@rambler.ru, skobova-nv@mail.ru)

Аннотация: В статье представлены результаты исследования кинетических закономерностей сушки ткани с микропористым полиуретановым покрытием. По результатам экспериментальных исследований рекомендованы рациональные температура и длительность сушки в зависимости от кратности вспенивания полиуретановой композиции.

Abstract: The article presents the results of a study of the kinetic patterns of drying fabric with a microporous polyurethane coating. Based on the results of experimental studies, rational temperatures and drying durations are recommended depending on the foaming ratio of the polyurethane composition.

Ключевые слова: ткань, вспененное полиуретановое покрытие, конвективная сушка, кинетика сушки, рациональные режимы.

Keywords: fabric, polyurethane foam coating, convective drying, drying kinetics, rational modes.

Полимерные покрытия широко используются для функционализации текстильных материалов. Такие материалы широко востребованы как при производстве одежды, галантереи, так и в качестве технических материалов. Возможности полимерно-текстильных материалов чрезвычайно широки благодаря неисчерпаемой вариабельности их составов, многообразию полимеров и наполнителей, способам их модификации и взаимораспределения [1]. В качестве полимеров для формирования покрытий используют: полиуретан (ПУ), поливинилхлорид (ПВХ), поливинилденхлорид (ПВДХ), полимметриметакрилат (ПММА), этиленвинил ацетат (ЭВА), полиолефины, полипропилен (ПП), СВМПЭ, силикон, политетрафторэтилен (ПТФЭ) и другие [2]. На сегодняшний день наиболее популярным является полиуретан. Благодаря своей молекулярной структуре полиуретан обладает как прочностью, так и эластичностью, что является уникальным свойством [3, 4].

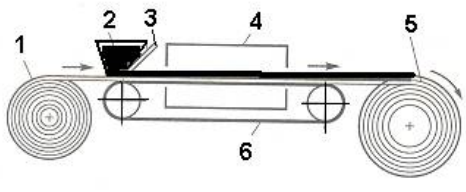
Для получения тканей одежного назначения с высокими показателями воздухо- и паропроницаемости полиуретановая композиция предварительно вспенивается. Технология производства предполагает возможность варьирования кратности вспенивания композиции, что позволяет получить материал с заданными потребительскими свойствами. Повышение или снижение кратности пены влечет за собой необходимость внесения корректировок в режим сушки материала (длительность, температура), поскольку длительное воздействие повышенных температур может приводить к нарушению целостности полимерного покрытия. Принимая во внимание данный факт, оптимизация процесса сушки является актуальной задачей.

Цель исследования – установить кинетические закономерности сушки ткани с микропористым полиуретановым покрытием, что позволит рекомендовать рациональные режимы для различных кратностей вспенивания полимерной композиции.

Объект исследования – ткань с микропористым полиуретановым покрытием одежного назначения. Опытные образцы получены в лабораторных условиях УО «Витебский

государственный технологический университет». В качестве основы использовали хлопчатобумажную ткань полотняного переплетения поверхностной плотностью 122,7 г/м^2 с водоотталкивающей отделкой. Для покрытия использована полимерная композиция, составленная из компонентов АО «Пигмент» (Российская Федерация, г. Тамбов). Основным компонентом для покрытия использована анионная полиуретановая дисперсия с массовой долей сухого вещества 40%.

Нанесение полимерного покрытия осуществлялось шаберным способом (рисунок 1), который основан на удалении с поверхности ткани избытка полимерной массы при помощи специального ножа. Перед нанесением полимерная композиция подвергается механическому вспениванию до установленной кратности. Ткань с нанесенным покрытием подают в сушильную камеру, где осуществляется удаление избыточной влаги в условиях принудительной конвекции.



1 – ткань-основа, 2 – вспененная композиция PU, 3 – шабер,
4 – термокамера, 5 – ткань с покрытием, 6 – транспортирующий конвейер

Рисунок 1 — Схема нанесения PU покрытия

С помощью динамического миксера полиуретановая композиция вспенена механическим способом до кратностей $\beta_{п1}$=1,5, $\beta_{п2}$=2,0, $\beta_{п3}$=2,5. Плотность дисперсий составила $\rho_{1,5}$=0,81 г/см^3, $\rho_{2,0}$=0,49 г/см^3, $\rho_{2,5}$=0,39 г/см^3.

Для установления закономерностей сушки вспененной полиуретановой композиции и формирования равномерного покрытия проведены экспериментальные исследования при следующих условиях:

– температура воздуха в сушильной камере для кратности 1,5 выбрана 90 °С, для кратности 2,0 – 80 °С, для кратности 2,5 – 60 °С.

– способ сушки – конвективный, режим работы сушильной установки – установившийся.

Температуры сушки выбраны с учетом предварительных испытаний [5], в ходе которых установлено, что при более высоких температурах для каждой из кратности покрытие трескается, что является недопустимым. На рисунке 2 представлены графики изменения температуры.

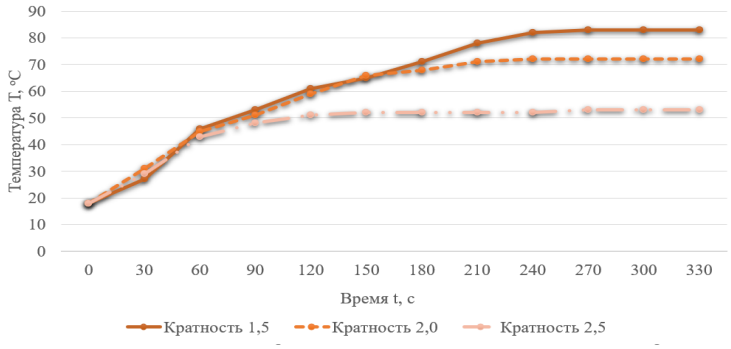


Рисунок 2 — Кинетика нагрева ткани с PU покрытием

Как видно, при кратности пены полиуретановой композиции 1,5 покрытие нагревается до температуры 80 °С за 240 с, для кратности 2,0 прогрев материала до 70 °С осуществляется за 210 с, а для кратности 2,5 за 120 с температура материала достигает 50 °С.

В результате исследований установлено, что в начале процесса сушки на поверхности образца образуется пленка, при этом сердцевина и контактирующая с тканой основой поверхность образца оставались влажными. Влага скапливалась в месте наименьшего сопротивления – на поверхности контакта полимерного слоя с тканой подложкой. Начальное влагосодержание образца с покрытием при $\beta_{п3}$=2,5 значительно меньше, чем при $\beta_{п1}$=1,5, $\beta_{п2}$=2,0 (рисунок 3).

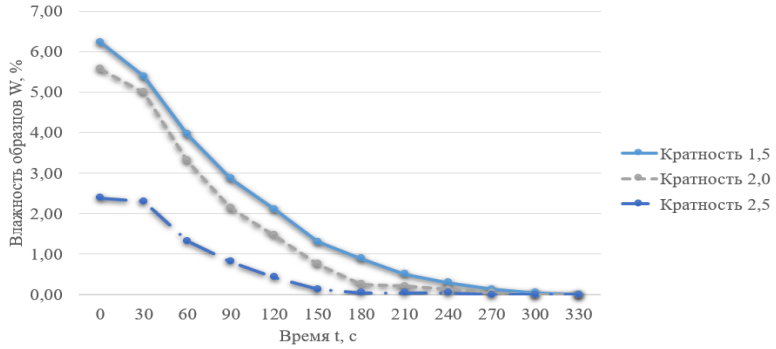


Рисунок 3 — Кривые сушки ткани с PU покрытием

При кратности пены полиуретановой композиции $\beta_{п3}$=2,5 уменьшение влагосодержания начинается после 30 с, т.е. наблюдается период прогрева до температуры начала испарения влаги, содержащейся в полимерной композиции, и далее протекает в периоде падающей скорости сушки. Низковязкие композиции ($\beta_{п1}$=1,5, $\beta_{п2}$=2,0) глубже проникают в структуру тканой основы, толщина покрытия снижается, период прогрева непродолжителен, сушка протекает в периоде постоянной скорости, который более продолжительный для ткани с покрытием при кратности вспенивания 1,5. Равновесное влагосодержание для образцов с кратностью полиуретановой композиции $\beta_{п3}$=2,5 при температуре сушки 60 ºС достигается за 160 с, для $\beta_{п2}$=2,0 при температуре сушки 80 ºС за 240 с, для $\beta_{п1}$=1,5 при температуре сушки 90 ºС за 300 с.

Анализируя кривые скорости сушки (рисунки 4-6), можно выделить два характерных участка с постоянной скоростью сушки для материалов с кратностью пены полиуретановой композиции $\beta_{п1}$=1,5, $\beta_{п2}$=2,0, который отсутствует для ткани с покрытием $\beta_{п3}$=2,5.



Рисунок 4 — Кривая скорости сушки ткани с PU покрытием с кратностью 1,5

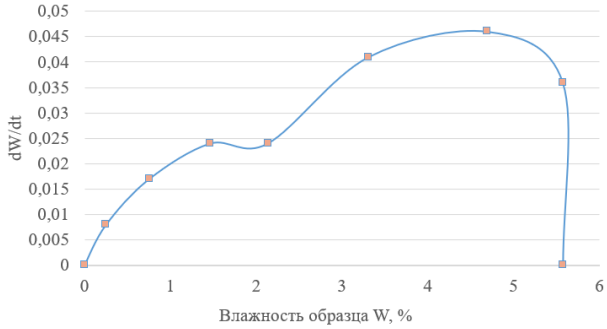


Рисунок 5 — Кривая скорости сушки ткани с PU покрытием с кратностью 2,0

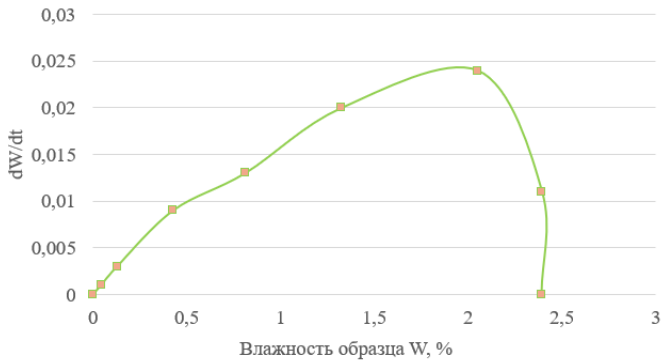


Рисунок 6 — Кривая скорости сушки ткани с PU покрытием с кратностью 2,5

На первом участке происходит рост скорости сушки до максимальных значений, который соответствует удалению влаги в свободном состоянии с поверхности покрытия. Движение влаги из материала осуществляется в виде пара, образовавшегося на границе «ткань-покрытие». В силу интенсивного испарения влаги исключаются риски перегрева покрытия и его растрескивания. На втором участке постоянной скорости сушки происходит удаление влаги в виде пара, образовавшегося внутри пузырьков пены и диффундирующего через каркас полимерной пленки. С повышением кратности пены полиуретановой композиции скорость сушки уменьшается.

Выводы

Таким образом, установлены кинетические закономерности сушки ткани с микропористым полиуретановым покрытием. При кратности пены полиуретановой композиции $\beta_{п3}$=2,5 на кинетических кривых сушки наблюдается период прогрева до температуры начала испарения влаги, содержащейся в полимерной композиции и далее сушка протекает в периоде падающей скорости. В результате анализа кривых скорости сушки покрытий низковязких композиций ($\beta_{п1}$=1,5, $\beta_{п2}$=2,0) определены два характерных участка с постоянной скоростью сушки. В результате исследования процесса конвективной сушки тканей с полиуретановым покрытием рекомендованы рациональные режимы, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Режимы термообработки тканей с PU покрытием.

Кратность пены PU композиции	**1,5**	**2,0**	**2,5**
Температура сушки, ºС	90	80	60
Длительность сушки, с	300	240	160

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ясинская Н.Н. Композиционные текстильные материалы: монография / Н.Н. Ясинская, В.И. Ольшанский, А.Г. Коган. – Витебск, 2015. – 298 с.

2. Вишневская О.В. Современные методы нанесения покрытия на текстиль // Вестник Казанского технологического университета. 2016. №18. С. 69-72.

3. Бекашева А.С. Характеристики и свойства экокожи – материала, имитирующего натуральную кожу // Вестник Казанского технологического университета. 2015. №16. С. 134-136.

4. Бокова Е.С., Андрианова Г.П. Полиуретаны в производстве искусственных и синтетических кож // Полиуретановые технологии. 2008. №4 (17).

5. Марущак Ю.И. Исследование влияния температуры сушки на качество «экокожи» // Матер. Международной научно-практической конференции «Лёгкая промышленность: проблемы и перспективы». Омск: ОмГТУ, 2022. С. 52-57.

УДК 677.4 DOI: 10.37816/eeste-2024-1-312-316

ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОГО НАПРАВЛЕНИЯ АРМИРОВАНИЯ КОМПОЗИТОВ НА ТЕКСТИЛЬНОЙ ОСНОВЕ
SELECTION OF A RATIONAL DIRECTION FOR REINFORCEMENT OF TEXTILE-BASED COMPOSITES

Ксения Юрьевна Струнκина*, Павел Николаевич Рудовский**
Ksenia Yu. Strunkina, Pavel N. Rudovsky

**Костромской государственный университет (КГУ), Россия, Кострома*
**Kostroma State University (KSU), Russia, Kostroma*
(e-mail: pavel rudovsky@mail.ru)
*** Военная Академия радиационной, химической и биологической защиты имени маршала Советского Союза С. К. Тимошенко, Россия, Кострома*
*** Military Academy of Radiation, Chemical and Biological Defense named after Marshal of the Soviet Union S.K. Timoshenko, Russia, Kostroma*
(e-mail: strunkina.ksyu@mail.ru)

Аннотация: В статье рассмотрен алгоритм расчета кривых укладки нитей армирующего наполнителя для композиционного материала, обеспечивающих наиболее полное использование прочности наполнителя. Показано, что использование в качестве армирующего наполнителя тканей любых структур не учитывает реальное распределение напряжений в детали, изготовленной из композиционного материала. Поэтому главные напряжения, как правило, направлены под углом к направлению армирования. Для устранения этого недостатка предлагается формировать армирующий наполнитель путем раскладки по кривым касательные к которым совпадают с направлениями главных напряжений в каждой точки детали.

Получить распределение напряжений можно по результатам расчета детали в CAD-системе с учетом ее формы, закрепления и нагружения. В статье показано, как на основе этих данных можно рассчитать кривые укладки нитей армирующего наполнителя, обеспечивающих более полное использование его прочности в прочности композиционного материала.

Abstract: The article discusses an algorithm for calculating the laying curves of reinforcing filler threads for a composite material, ensuring the most complete use of the strength of the filler. It is shown that the use of fabrics of any structure as a reinforcing filler does not take into account the actual stress distribution in a part made of a composite material. Therefore, the main stresses are usually directed at an angle to the direction of the reinforcement. To eliminate this drawback, it is proposed to form a reinforcing filler by laying it out along curves whose tangents coincide with the directions of the main stresses at each point of the part.

The stress distribution can be obtained from the results of calculating the part in a CAD system, taking into account its shape, fastening and loading. The article shows how, based on these data, it is possible to calculate the laying curves of reinforcing filler threads, ensuring a more complete use of its strength in the strength of the composite material.

Ключевые слова: композитные материалы, армирующие нити, нормальные напряжения, касательные напряжения, кривые укладки армирующего компонента.

Keywords: composite materials, reinforcing threads, normal stresses, shear stresses, laying curves of the reinforcing component.

Применение композиционных материалов в различных областях техники находит все большее применение [1]. Это связано с их уникальными свойствами, позволяющими обеспечить сочетание разнообразных, зачастую трудно совместимых свойств, например,

высокую прочность и малую массу изделия. Широкое распространение получили композиты, использующие в качестве матрицы текстильные материалы, чаще всего ткани [2].

Ткани представляют собой переплетение двух (иногда трех) ортогональных систем нитей. Известны ткани более сложных структур, в которых системы нити располагаются не под прямыми углами [2 - 4]. Однако в любом случае направления нитей армирующего наполнителя остаются постоянными в разных точках внутри материала. В деталях, имеющих форму, определяемую конструктивными соображениями, и испытывающими сложное напряженное состояние, направление главных напряжений не остается постоянным, а изменяется от точки к точке. При этом известно [5], что наиболее эффективное использование прочности армирующего наполнителя в составе композита достигается в случае, если направление армирования совпадает с направлением главных напряжений. Таким образом, армирование композиционного материала тканями не позволяет достаточно полно использовать прочность армирования.

Повысить эффективность использования прочности армирующего наполнителя можно формируя наполнитель путем раскладки нитей по кривым, совпадающим с направлением главных напряжений в детали. Поскольку эти направления зависят от геометрии детали, ее закрепления и нагружения, то первым этапом процесса является расчет напряжений в детали. Расчет можно провести методом конечных элементов в одной из CAD-систем. Например, в ANSYS Mechanical APDL.

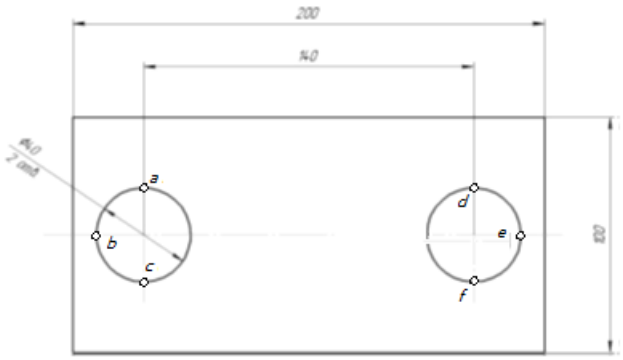


Рисунок 1 — Пластина с отверстиями.

Пусть требуется рассчитать расположение нитей армирующего компонента для детали, в виде пластины показанной на рисунке 1. Толщина пластины равна 5 мм. Пластина закреплена по дуге *abc* левого отверстия и растягивается распределенной нагрузкой *q* по дуге *def* правого отверстия.

Рассчитаем распределение напряжений в пластине с помощью Mechanical APDL, используя GUI. Для этого выполним следующую последовательность шагов:

1) Примем прямоугольную систему координат в центре пластины и рассчитаем координаты ключевых точек, определяющих ее геометрию.

2) Введем точки, полученные на шаге 1, в геометрическую модель пластины; соединим ключевые точки линиями; введём плоскость, ограниченную полученными линиями.

3) Назначим тип конечных элементов PLANE82, установим его толщину.

4) Назначим вид модели материала Isotropic. Выбранная модель характеризуется двумя параметрами: модулем упругости EX и коэффициентом Пуассона PRXY. Назначим указанным параметрам следующие значения соответственно: 2E11 и 0.3.

5) Назначим условия закрепления модели. Как уже отмечалось ранее, закреплена левая часть поверхности левого отверстия.

6) Назначим величину распределенной нагрузки *q* равной 10000 Н/м.

7) Разобьем полученную геометрическую модель на конечные элементы со следующими значениями параметров: SIZE = 0.01, NDIV = 0. На этом подготовка модели может считаться завершенной.

8) Проведем решение задачи с помощью следующей команды GUI: Solution>Solve>Current LS.

9) Получим направления главных напряжений (рисунок 2).

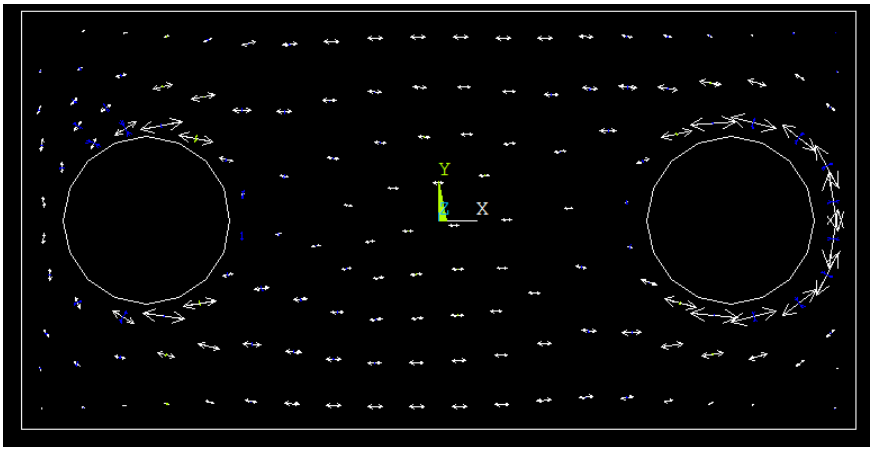


Рисунок 2 — Поле векторов главных напряжений.

Здесь стрелками показаны векторы наибольшего главного напряжения σ_1. Полученное изображение дает наглядную картину распределения напряжений, однако не позволяет в численном виде получить кривые, вдоль которых должны быть уложены нити армирующего наполнителя.

10) Получим численное решение распределения напряжений, воспользовавшись командой: Postrpoc>List Results>Nodal Solution. В результате мы получим таблицу 1, содержащую компоненты напряжений в принятой системе координат.

Таблица 1 – Номера узлов и значения напряжений в узлах.

NODE	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
1	1825,80	2393,90	0	-1132,90	0	0
2	-266,16	114,67	0	1128,20	0	0
3	4329,30	8133,60	0	-3609,20	0	0
4	6296,10	26790,00	0	-5520,80	0	0
5	-1319,30	35284,00	0	-10779,00	0	0
6	7846,60	49185,00	0	-121,25	0	0
7	13786,00	53015,00	0	-376,59	0	0
8	3366,70	42019,00	0	-1435,70	0	0
9	7072,00	40196,00	0	2846,30	0	0
10	1825,80	21744,00	0	4514,00	0	0
…	…	…	…	…	…	…
234	16470,00	-4280,60	0	3354,50	0	0

В этой таблице приведены номера узлов (NODE), компоненты нормальных напряжения в этих узлах σ_x, σ_y, σ_z (SX, SY, SZ), а также касательные напряжения τ_{xy}, τ_{yz}, τ_{xz} (SXY, SYZ, SXZ). В нашем случае рассматривается плоская задача, поэтому нормальное напряжение $\sigma_z=0$ и касательные напряжения $\tau_{yz}=0$, $\tau_{xz}=0$. Эти столбцы можно убрать из таблицы 1.

11) Для расчета кривых укладки армирующего компонента необходимо знать в каких точках рассчитаны напряжения, т.е. координаты соответствующих узлов. Получим их в виде таблицы. Совместим полученную таблицу, содержащую номера узлов и их координаты, и таблицу 1, содержащую номера узлов и значения напряжений в узлах. Получим таблицу 2:

Таблица 2 – Координаты узлов и соответствующие им напряжения.

NODE	X	Y	SX	SY	SXY
1	-0,10	-0,05	1825,80	2393,90	-1132,90
2	-0,10	0,05	-266,16	114,67	1128,20
3	-0,10	-0,04	4329,30	8133,60	-3609,20
4	-0,10	-0,03	6296,10	26790,00	-5520,80
5	-0,10	-0,02	-1319,30	35284,00	-10779,00
6	-0,10	-0,01	7846,60	49185,00	-121,25
7	-0,10	0,00	13786,00	53015,00	-376,59
8	-0,10	0,01	3366,70	42019,00	-1435,70
9	-0,10	0,02	7072,00	40196,00	2846,30
10	-0,10	0,03	1825,80	21744,00	4514,00
…	…	…	…	…	…
234	-0,04	0,00	16470,00	-4280,60	3354,50

12) Рассчитаем главные напряжения σ_1, σ_3 и направления главных напряжений α_1, α_3 в каждой точке, воспользовавшись следующими формулами [6].

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (1)$$

$$\sigma_3 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (2)$$

$$\alpha_1 = 0{,}5\mathrm{arctg}\frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \quad (3)$$

$$\alpha_3 = \frac{\pi}{2} + \alpha_1 \quad (4)$$

Сведем полученные значения в итоговую таблицу. Таким образом мы получили массив направлений главных напряжений α_1 и α_3. Имея его можно предложить алгоритм укладки нити. Нить укладывается слоями, например, в четных слоях по α_3, а в нечетных по α_1.

Таблица 3 – Углы наклона главных напряжений к оси OX.

NODE	X	Y	SX	SY	SXY	alf1, град	alf3, град
1	-0,10	-0,05	1825,80	2393,90	-1132,90	37,98	127,9622
2	-0,10	0,05	-266,16	114,67	1128,20	-40,23	49,78998
3	-0,10	-0,04	4329,30	8133,60	-3609,20	31,12	121,1048
4	-0,10	-0,03	6296,10	26790,00	-5520,80	14,16	104,1573
5	-0,10	-0,02	-1319,30	35284,00	-10779,00	15,26	105,2483
6	-0,10	-0,01	7846,60	49185,00	-121,25	0,17	90,16805
7	-0,10	0,00	13786,00	53015,00	-376,59	0,55	90,54996
8	-0,10	0,01	3366,70	42019,00	-1435,70	2,13	92,12429
9	-0,10	0,02	7072,00	40196,00	2846,30	-4,88	85,12428
10	-0,10	0,03	1825,80	21744,00	4514,00	-16,25	77,8087
…	…	…	…	…	…	…	…
234	-0,04	0,00	16470,00	-4280,60	3354,50	8,96	98,95842

Рассмотрим алгоритм укладки нити на основе данных о направлениях главных напряжений. На рисунке 3 схематично показано построение линии укладки армирующего наполнителя.

1. Выбираем какой-либо узел на контуре детали, например, 3. Согласно таблице 3 направление главных напряжений в этой точке имеет наклон в оси X равный 31,12°.

3. Из конца отрезка как из центра проводим окружность с радиусом 0,9Δ, где Δ=SIZE=0,01 мм.

4. Выбираем узлы, попавшие в эту окружность. Это узлы с номерами 184 и 185. В этих узлах главные напряжения направлены под углами – 30,66° и 44,74° соответственно.

6. Определяем среднее направление для главных напряжений в окрестности радиуса 0,9Δ (– 30,66+44,74)/2= 7,04°.

7. Проводим в этом направлении отрезок равный шагу интегрирования Δ. Процесс повторяется до пересечения контура детали.

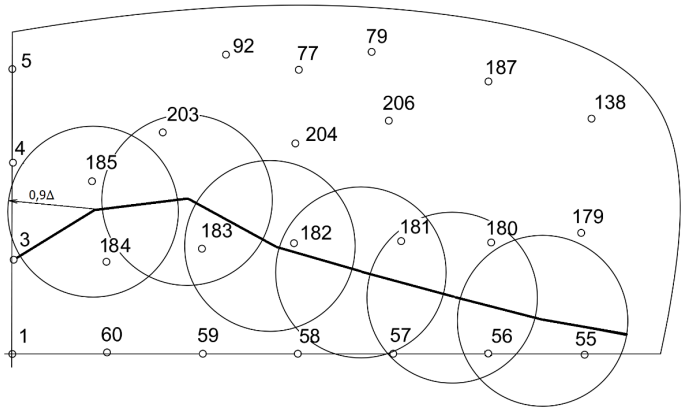


Рисунок 3 — Схема построения кривой укладки нити армирующего наполнителя

В дальнейшем построение производится из других узлов на контуре детали, включая узлы, расположенные на поверхности отверстий. Таким образом формируется первый слой армирующего наполнителя. Второй слой формируется аналогично, но в качестве угла используется α_3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов А.Ю., Госина К.К., Петров И.В., Макарова А.Е., Балова Д.Г. Пепеляев А.В. Композиционные материалы, области применения. Классификация, состав, достоинства и недостатки многокомпонентных композитных материалов // Омский Научный Вестник №3 (143) 2015. С. 42 – 45.

2. Зайцев Д.В., Гречухин А.П., Рудовский П.Н. Система заправки при формировании 3D-ортогонального тканого материала. Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2017. № 3 (369). С. 154-156.

3. Методика построения трехмерной модели ткани из углеродных нитей. Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2017. № 3 (369). С. 140-144.

4. Ушаков С.Н., Гречухин А.П., Рудовский П.Н., Палочкин С.В. Влияние величины смещения слоя горизонтального утка на плотность расположения вертикальных слоев нитей при формировании трехмерных ортогональных тканей. Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2018. № 6 (378). С. 96-100.

5. Образцов И.Ф., Васильев В.В., Бунаков В.А. Оптимальное армирование оболочек вращения из композиционных материалов. М.: «Машиностроение», 1977. 144 с.

6. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов: учеб. для вузов. 15 изд. испр. М.: Изд-во МГТУ им. М.Э.Баумана, 2010. 500с.

УДК 661.183.2.+620.181 DOI: 10.37816/eeste-2024-1-317-321

ПОЛУЧЕНИЕ УГЛЕРОДНЫХ СОРБЕНТОВ ИЗ ВОЗОБНОВЛЯЕМОГО РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ
PRODUCTION OF CARBON SORBENTS FROM RENEWABLE PLANT RAW MATERIALS

Марианна Анатольевна Середина
Marianna Anatolyevna Seredina

Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), Россия, Москва
The Kosygin State University of Russia, Russia, Moscow
(e-mail: maseredina@mail.ru)

Аннотация: Исследованы процессы термолиза и карбонизации рисовой шелухи при получении углеродных материалов. Установлено, что на выход карбонизованного остатка (КО) термолиза объектов исследования влияют условия проведения процесса, химический состав растительного материала и его морфологическая структура. Получены углеродные сорбенты, которые могут быть использованы для очистки сточных вод и газовоздушных выбросов промышленных предприятий

Abstract: The processes of thermolysis and carbonation of rice husk in the production of carbon materials are investigated. It was found that the yield of the carbonized residue (CO) of thermolysis of the objects of study is influenced by the conditions of the process, the chemical composition of the plant material and its morphological structure. . Carbon sorbents have been obtained, which can be used for wastewater treatment and gas-air emissions of industrial enterprises

Ключевые слова: углеродные сорбенты, активированные угли, рисовая шелуха, термолиз, карбонизованный остаток, карбонизация, пиролитические добавки, сорбция.

Keywords: carbon sorbents, activated carbons, rice husk, thermolysis, carbonized residue, carbonation, pyrolytic additives, sorption.

В настоящее время вопросы защиты окружающей среды и экологической безопасности приобретают всё более важное значение во всех странах мира. Особо остро эти вопросы стоят перед странами с интенсивно развивающейся промышленностью и большим агрономическим потенциалом. При этом важно не только разрабатывать эффективные технологии предотвращения загрязнения окружающей среды, но и создавать материалы с заданным комплексом свойств для их реализации. Как известно, активные угли являются универсальными сорбционными материалами, применяемыми во многих сферах человеческой жизнедеятельности: в промышленности, сельском хозяйстве, военно-промышленном комплексе, медицине, водоподготовке, производстве экологически чистой продукции, и т.д. Благодаря своим уникальным сорбционным свойствам они позволяют решать многие промышленные и экологические задачи, в некоторых случаях снижая экономические затраты [1].

В качестве сырья для производства недорогих углеродных сорбентов используют такие продукты растительного происхождения, как лигнин, целлюлоза, плодовые косточки, соевые шроты, шелуха подсолнечника и кофе, скорлупа орехов, пустые стручки сельскохозяйственных культур, хитинсодержащие материалы, полученные при комплексной переработке материалов биогенного происхождения [2].

Мировое производство риса в 2022 году составило 515 миллион тонн, из которых образовалось примерно 120 миллионов тонн шелухи.. В основных странах-производителях риса (90 % производства), таких как Китай, Индия, Индонезия и Вьетнам, рисовые отходы исчисляются миллионами тонн. Основное количество рисовой шелухи сжигается или

сбрасывается в канализацию, что приводит к загрязнению окружающей среды. Основными компонентами рисовой шелухи являются целлюлоза, гемицеллюлоза, лигнин и минеральные соединения. Содержание их зависит от сорта риса, климатических условий и даже географической локализации культуры. Переработка рисовой шелухи в углеродный материал позволит, с одной стороны, решать проблемы утилизации этих отходов, с другой стороны, даст возможность расширить ассортимент углеродных сорбентов.

Активированные угли получают карбонизацией и последующей активации органических веществ растительного происхождения. Углеродосодержащие сырье подвергается термообработке без доступа воздуха с целью удаления летучих компонентов из материалов и формирования первичной пористости. Карбонизат обладает недостаточными адсорбционными свойствами, поэтому его подвергают активации. Существует два основных метода активации: химическая и паро-газовая активация [1,3].

Для получения углеродного материала с комплексом требуемых физико-механических и физико-химических свойств необходимо рациональное регулирования скоростей отдельных элементарных реакций, что предполагает знание закономерностей их протекания и влияния на них различных факторов (температурно-временной режим термообработки, среда пиролиза, вводимые добавки) [3,4].

Процесс термоокислительного разложения рисовой шелухи (РШ) исследовали методом термогравиметрического анализа (ТГА). Анализ кривой ТГА показал, что термораспад РШ протекает в широком температурном интервале от 220°С до 350°С. При этом температура максимальной скорости разложения составляет 317°С, что соответствует температуре основной стадии терморазпада целлюлозы. Глубина протекания реакции деполимеризации, обуславливающей наибольшую потерю массы, зависит не только от интенсивности окислительных процессов, но и от структуры исходной целлюлозы и наличия в ней примесей и добавок.

Установлено, что действие большинства пиролитических добавок связано с катализом реакции дегидратации и ингибированием деполимеризации, а также с участием таких веществ (антипиренов) во вторичных реакциях, связанных с деструкцией и полимеризацией легковоспламеняющихся летучих и смолистых продуктов. В качестве таких добавок используют сильные минеральные кислоты, соединения фосфора и бора, соли аммония, хлорсиланы, соли металлов переменной валентности [3,4].

В качестве пиролитических добавок для обработки РШ использовали борную кислоту (БК), ортофосфорную кислоту (ОФК) и диаммоний фосфат (ДАФ). Образцы РШ, модифицированные указанными добавками, исследовали методом ТГА.

Согласно данным ТГА РШ, модифицированной ДАФ, термолиз материала протекает в интервале температур, наиболее близком к температурному интервалу терморазпада исходной РШ (317°С). При этом скорость разложения и КО термолиза РШ, содержащей ДАФ, изменились незначительно. Действие фосфоразотсодержащих соединений определяется не только их каталитической активностью в реакциях коксования, но и высокими эндотермическими эффектами за счет испарения воды и аммиака [3,4].Согласно данным ТГА РШ, модифицированной ОФК, термическое разложение материала происходит в более узком температурном интервале и максимум скорости разложения сдвинут в область более низких температур на 48°С по сравнению с температурой терморазпада исходной РШ.

Результаты ТГА РШ, модифицированной БК, показывают, что введение бора в состав целлюлозного материала приводит к увеличению скорости максимального разложения РШ по сравнению со скоростью деструкции исходного материала и содержащих ОФК и ДАФ. При этом максимум температурного интервала терморазпала исследуемого материала сдвинут в высокотемпературную область, что свидетельствует об образовании при термолизе БК тугоплавкого борного ангидрида.

При термолизе РШ, содержащей ОФК, наблюдается максимальный выход КО терморазпада материала, что объясняется значительным снижением температуры максимальной скорости разложения РШ в присутствии ОФК, который составляет 269°С. Это

значительно меньше по сравнению с температурой терморазпада РШ в присутствии БК и незначительно меньше по сравнению с температурой терморазпада РШ, содержащей ДАФ. Фосфорсодержащие пиролитические добавки разрушаются при более низких температурах, чем полимеры, что обуславливает образование частиц, ингибирующих процессы термоокисления и катализирующих коксообразование. Распад фосфорсодержащих добавок происходит обычно с образованием фрагментов PO_4, что способствует коксованию материала [4].

Деструкция РШ происходит преимущественно в области температур 300-350°С и на этой стадии разрушается целлюлоза, но еще не протекают процессы конденсации, приводящие к появлению структурных элементов углерода. Ароматизация углерода начинает интенсивно протекать только при температуре выше 500°С, на это указывает образование турбостратных структур углерода и накопление сопряженных углерод-углеродных связей. Только в процессе карбонизации возможно преобразование структуры целлюлозного материала в углеродную [3, 5, 6].

Исследовано влияние пиролитических добавок и температуры карбонизации на выход карбонизатов исходной РШ и модифицированной пиролитическими добавками. Процесс карбонизации целлюлозных материалов проводили в трубчатой печи в атмосфере азота со скоростью подъема температуры 5 °С /мин до конечной температуры 500 °С и 700 °С. Результаты исследований представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты карбонизации рисовой шелухи

Наименование материала	КО,% при температуре карбонизации	
	500°С	700°С
Исходная РШ	48,4	43,4
РШ + БК	54,6	**46,7**
РШ + ДАФ	51,4	45,9
РШ + ОФК	52,7	43,8

Введение пиролитических добавок приводит к небольшому повышению выхода карбонизатов при обоих температурах по сравнению с выходом карбонизата исходной РШ. Следует отметить, что специфическое действие используемых добавок состоит в том, что под их воздействием интенсивно протекает дегидратация целлюлозы и тем самым подавляются другие реакции, приводящие к уменьшению выхода углерода. Например, КО термолиза РШ, содержащей борную кислоту, составляет 40,7 %, а продукт карбонизации указанного материала достигает значения 54,6%. Выходы продуктов карбонизации РШ, содержащей ДАФ и ОФК незначительно ниже и составляют 51,4 и 52,7% соответственно. Результаты исследований показали, что процесс карбонизации РШ, модифицированной пиролитическими добавками целесообразно проводить при температуре 500°С в защитной среде, так как повышение температуры до 700 °С приводит к снижению выхода карбонизатов.

Поверхность углеродных материалов представлена группами кислотного и нейтрального типа, поверхностными основаниями, гетероатомами, фрагментами электронной системы и парамагнитными центрами, оказывающими разное активирующее действие на контактирующие с ними веществами.

Основной характеристикой сорбционных свойств активированных углей является их поглотительная способность к раствору йода, который используют как вещество – маркер при изучении сорбционных свойств углеродных сорбентов. Исследование сорбционных свойств полученных карбонизатов показало, что наиболее высокими сорбционными свойствами обладает карбонизат РШ, модифицированной ОФК (таблица 2). Это объясняется тем, что протекающее со значительной скоростью образование сложных эфиров этой кислоты с

целлюлозой при повышенных температурах обеспечивает интенсивное протекание реакции дегидратации целлюлозы, что способствует образованию пористой структуры [3,5].

Таблица 2 - Физико-химические показатели карбонизованной рисовой шелухи

Наименование материала	Выход карбонизата, %	Сорбция иода, мг/г	Содержание кислотных групп, мг/г	Сорбция цинка, мг/г
Исходная РШ	43,4	9,0	0,8	0,7
РШ+ БК	46,7	30.3	1,5	1,0
РШ +ДАФ	45,9	76,4	1,8	1,3
РШ+ ОФК	43,8	107,6	4,5	1,8

Пониженная сорбционная способность карбонизатов, содержащих ДАФ и БК к йоду, обусловлена ограниченным доступом молекул сорбата из-за образования в структуре материалов защитного слоя из полифосфорных кислот и тугоплавкого борного ангидрида соответственно, что снижает содержанием пор в общем объеме карбонизатов. Значительные отличия по сорбционной способности объясняются так же неоднородностью структуры растительного материала.

В настоящее время тяжелые металлы представляют группу особо опасных загрязнителей окружающей среды. Для удаления тяжелых металлов из сточных вод наиболее эффективными являются адсорбционные методы очистки. Процесс сорбции ионов цинка карбонизатами изучен путем извлечения катионов металла из водного раствора сульфата цинка.(Таблица 2).Карбонизат, содержащий ОФК, обладает наиболее высокой сорбционной способностью к ионам цинка по сравнению с сорбцией карбонизатами, содержащими БК и ДАФ и в 2,5 раза больше сорбции карбонизатом исходной РШ. Различие в сорбционных свойствах карбонизатов объясняется влиянием химической природы функциональных групп, содержащихся в карбонизованных материалах. В карбонизате, полученном из исходной РШ, сорбция ионов цинка минимальна, так как в этом материале содержатся только группы кислотного характера, оставшиеся после термических превращений целлюлозы. В карбонизатах, модифицированных БК, ДАФ и ОФК, присутствуют кислотные группы, образующееся в результате термической деструкции указанных добавок. Более высокая сорбционная способность карбонизата, содержащего ОФК, объясняется наличием повышенного количества поверхностных функциональных групп кислотного характера. Полученные результаты свидетельствует о том, что разработанные углеродные сорбенты способны извлекать из водных сред катионы тяжелых металлов и других соединений.

Выводы

Установлено влияние пиролитических добавок и параметров процесса термолиза рисовой шелухи на выход карбонизованного остатка термической деструкции рисовой шелухи, модифицированной борной кислотой, диаммонием фосфатом или ортофосфорной кислотой. Показано, что на выход карбонизованного остатка термической деструкции оказывают параметры процесса, а также химическая природа рисовой шелухи и пиролитических добавок.

В процессе карбонизации рисовой шелухи, модифицированной пиролитическими добавками, получены углеродные материалы с высоким содержанием углерода (более 85%) и значительным выходом готового продукта. Показано, что термохимические превращения рисовой шелухи при получении углеродных сорбентов зависят от условий проведения процесса и химического состава растительного материала.

Сорбционная способность углеродных материалов зависит от параметров процесса карбонизации растительного сырья и определяется химической природой пиролитической

добавки, используемой для модификации. Полученные сорбенты могут быть использованы для очистки сточных вод от ионов металлов методом ионного обмена.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юркевич А.А. /Технологические основы производства химических компонентов систем жизнеобеспечения/ А.А., Юркевич, Г.К. Ивахнюк, Н.Ф Федоров., М.А.- Пименова Спб.: Лань, 2015.- 368 с.

2. Ануров С.А. Получение углеродных адсорбентов из растительных отходов / С.А., Ануров, Т.В., Анурова, В.Н., Клушин, М.А. Мухин, В.Е. Мышкин // Исследовано в России. - 2011.-№1.-С. 199-211.

3. Ермоленко И.Н. Элементосодержащие угольные волокнистые материалы / И.Н. Ермоленко, И.П. Люблинер, Н.В. Гулько . – Мн.: Наука и техника, 1982. – 272 с.

4 Михайлин Ю. А. Тепло-, термо-, и огнестойкость полимерных материалов. – СПб.: Профессия, 2011. – 238 с.

5. Ruiz-Rosas R. et al. On the role of porosity and chemical composition of the surface of phosphorus-containing activated carbons in the removal of micro-contamination // Boundaries in materials. – 2019. – Vol. 6. – P. 134-138.

6.Сазанов Ю.Н. Карбонизация полимеров / Ю.Н. Сазанов, А.В. Грибанов. – СПб.: Научные основы и технологии, 2013. -296 с.

УДК 678.5 DOI: 10.37816/eeste-2024-1-322-326

РЕЦИКЛИНГ КАК СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ВОЛОКОН
RECYCLING AS A WAY TO PRODUCE CHEMICAL FIBRES

Александра Сергеевна Ставропольцева *, Ирина Игоревна Меньшова*, Людмила Васильевна Редина**
Alexandra S. Stavropoltseva *, Irina I. Menshova *, Lyudmila V. Redina**

** Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Россия, Москва*
** Mendeleev University of Chemical Technology of Russia*
***Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), Россия, Москва)*
*** The Kosygin State University of Russia, Russia, Moscow*
(e-mail: imenshova2022 gmail.com)

Аннотация: Проанализированы различные способы рециклинга отходов полиэтилентерефталата (ПЭТФ) – химический и физико-механический. Рассмотрен способ рециклинга пластиковых бутылок в полиэфирное волокно. Проанализирован технологический процесс производства полиэфирного нити из ПЭТФ бутылок.

Abstract: Various methods of recycling of polyethylene terephthalate (PET) waste - chemical and physical-mechanical - are analysed. The method of recycling of plastic bottles into polyester fibre is considered. The technological process of production of polyester yarn from PET bottles is analysed.

Ключевые слова: рециклинг, полиэфирное волокно, полиэтилентерефталат, твердые бытовые отходы, экономика замкнутого цикла, ПЭТ флекс.

Keywords: recycling, polyester fiber, polyethylene terephthalate, plastic waste, circular economy, plastic flakes.

В России создается система организационного рециклинга, которая позволяет снизить экологические проблемы путем применения технологий ресурсосбережения и сокращения полигонов твердых бытовых отходов (ТБО). Темпы роста потребления полимеров опережают спрос на другие материалы. Самым используемым материалом для производства пищевой и другой упаковки является пластик, который вытеснил такие материалы как стекло, металлы и бумагу. При этом упаковка – изделие с коротким жизненным циклом, доля упаковки среди полимерных отходов составляет более 63%.

В концепции циркулярной экономики минимизация сырья достигается за счет энерго- и ресурсоэффективных мероприятий. К ним относится рециклинг, регенерация, рекуперация, производство изделий с наибольшим жизненным циклом. Ресурсные циклы (или петли) — это цепочка производства от использования до исчерпания полезности товара и его утилизация с последующим возвратом в цикл производства этого товара.

Физический способ или механический рециклинг включает сортировку, очищение, измельчение, повторную мойку, плавление, экструзию и грануляцию.

Отходы полиэтилентерефталата (ПЭТФ) в 2022 г. составили 29,1 млн. т., основная часть которых приходится на ПЭТ бутылки. Пластиковые отходы не являются токсичными и не наносят вред окружающей среде, но захламляют её. При переработке 1т ПЭТФ освобождается 5 м^3 объёма полигона, вторичное использование которого способствует снижению электропотребления, минимизируя выбросы CO_2 в атмосферу. Росту сбора и переработки ПЭТ бутылок также способствует цена на регранулят, которая равна 70–80 % от стоимости первичного полимера.

Существуют различные способы возвращения пластиковых отходов ТБО в производство новых изделий: литье новой тары, деполимеризация до различных мономеров, получение гранул и порошка полимера [1,2]. Известно, что химическая переработка ПЭТФ

позволяет получить большой спектр продуктов вторичного сырья, включая сырье, необходимое для производства химических волокон. В работе [3] была установлена взаимосвязь между условиями проведения деполимеризации, омыляющим агентом и степенью разложения ПЭТФ отходов (рисунок 1).

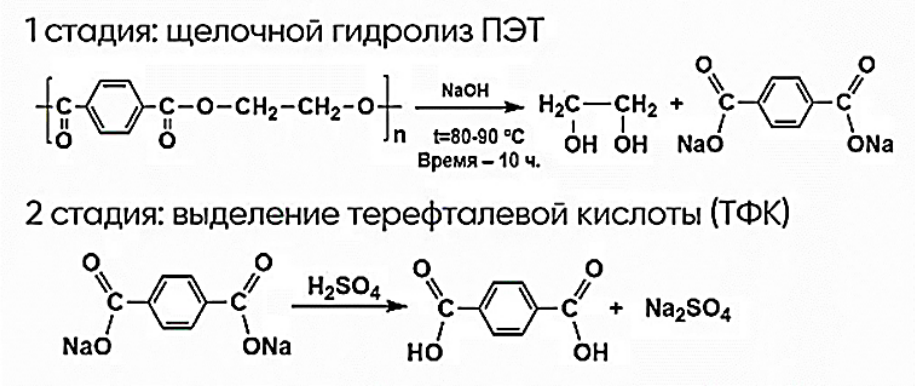


Рисунок 1 — Реакции щелочного гидролиза ПЭТ флексов [3]

Образование терефталевой кислоты при щелочном гидролизе ПЭТФ протекает в две стадии, в отличие от других способов деполимеризации. Известен также способ деполимеризации отходов ПЭТФ этиленгликолем или глицерином с получением олигомеров с регулируемым строением.

Из отходов ПЭТФ формуют волокна из расплава полимера методом экструзии, а также методом электроформования получают нановолокна диаметром 200-600 нм [4, 5, 6].

Наиболее часто ПЭТ бутылки перерабатываются во вторичный гранулят или ПЭТ флекс, из которых получают, в основном, грубые волокна для нетканых материалов и наполнителей. Для формования комплексных ПЭТФ нитей требуется более высокая чистота отходов из ПЭТ бутылок, максимально приближающаяся к качеству первичного сырья [4].

В таблице 1 представлены основные характеристики первичного, вторичного гранулята ПЭТФ и ПЭТ флекс [4]. Расплав из переработанного ПЭТФ имеет вязкость близкую к исходному первичному грануляту. По сыпучести флексы значительно отличаются от гранулята, так как их насыпная плотность в три раза ниже. Содержание загрязнений – высокое, устранение этого недостатка возможно путем применения двойной фильтрации расплава.

Таблица1 — Сравнительная характеристика гранулята ПЭТФ и ПЭТ флекс

Материалы /Показатели	Первичный гранулят	Вторичный гранулят	ПЭТ флекс
Характеристическая вязкость, дл/г	0,62÷0,64	0,70÷0,75	0,76÷0,82
Форма частиц	Равномерная цилиндрическая	Равномерная цилиндрическая	Неравномерная плоская , вытянутая
Размеры частиц, мм	~диаметр-2,5 х3,5	~диаметр-2,5 х3,5	~диаметр-7 х7до 12х12
Насыпная плотность, кг/дм^3	0,7÷0,8	0,7÷0,8	0,25÷0,30
Загрязнения постоянными примесями	нет	Умеренное	Высокое

При соблюдении требований к ПЭТ флексу и технологическим параметрам их переработки можно получить ПЭТФ комплексную текстильную нить того же качества, как и при использовании первичного стандартного гранулята [4]. В таблице 2, приведены характеристики суровой и окрашенной нитей, полученных из ПЭТ флекса.

Таблица 2 — Характеристики суровой и окрашенной нитей, полученных из ПЭТ флекса [4]

Показатели нити, Параметры процесса	Единицы измерения	Суровая	Окрашенная
Линейная плотность	дтекс	167	167
Скорость намотки на бобины	м/мин	3200	3100
Линейная плотность при формовании POY (предориентированная)	дтекс	290	290
Линейная плотность после фрикционного текстурирования DTY(ориентированная)	дтекс	167	167
Скорость фрикционного текстурирования	м/мин	750	700
Прочность нити POY	гс/текс	24,12	23,22
Разрывное удлинение нити POY	%	120	125
Прочность нити DTY	гс/текс	43,2	40,5
Разрывное удлинение нити DTY	%	20	18

Технологический процесс получения полиэфирной нити из ПЭТ бутылок включает стадии: производство ПЭТ флекса, плавление и двойную фильтрацию расплава, формование волокна из расплава полимера и последующую обработку волокна [7,8,9]. Для реализации этого процесса может быть использована отечественная линия переработки ПЭТ бутылок и получение флекса на базе оборудования компании «POLIMECH», и линия получения из него полиэфирного волокна и нитей, поставляемая ООО «Компания Астат» г. Новосибирск [10,11,12]. В таблице 3 описаны составляющие линии производства полиэфирного волокна из ПЭТ бутылок.

Таблица 3 — Основное оборудование для производства полиэфирного волокна из ПЭТ бутылок

Комплекс оборудования для переработки ПЭТ-бутылок	Линия по производству полиэфирного волокна
- Кипоразбиватель - Ленточный транспортер - Грохот - Транспортер-металлодетектор - Отделитель этикетки моющий - Просеиватель - Дробилка - Интенсивная мойка - Центрифуга - Флотационная мойка - Горячая планерная мойка - Интенсивная мойка - Флотационная мойка - Циклон-накопитель - Пневмофасовка - Пневмовыгрузка - Система очистки воды	- Двухшнековый экструдер - Фильерная балка - Охлаждающая шахта - Приемное устройство - Узел прядильной препарации - Паровая камера - Вытяжной стан - Приемно-намоточные устройства

Для решения технико-экономической эффективности процесса рециклинга и технологических процессов, как бизнес-процессов с партнерами производства, применяют логико-информационные модели. Логико-информационная модель бизнес-процессов позволяет символически выразить взаимосвязь между всеми рабочими группами разрабатываемого проекта. С использованием программы IDEF0 [13] разработана логико-информационная модель бизнес-процесса получения полиэфирных волокон из ПЭТ бутылок. Схема модели представлена на рисунке 2.

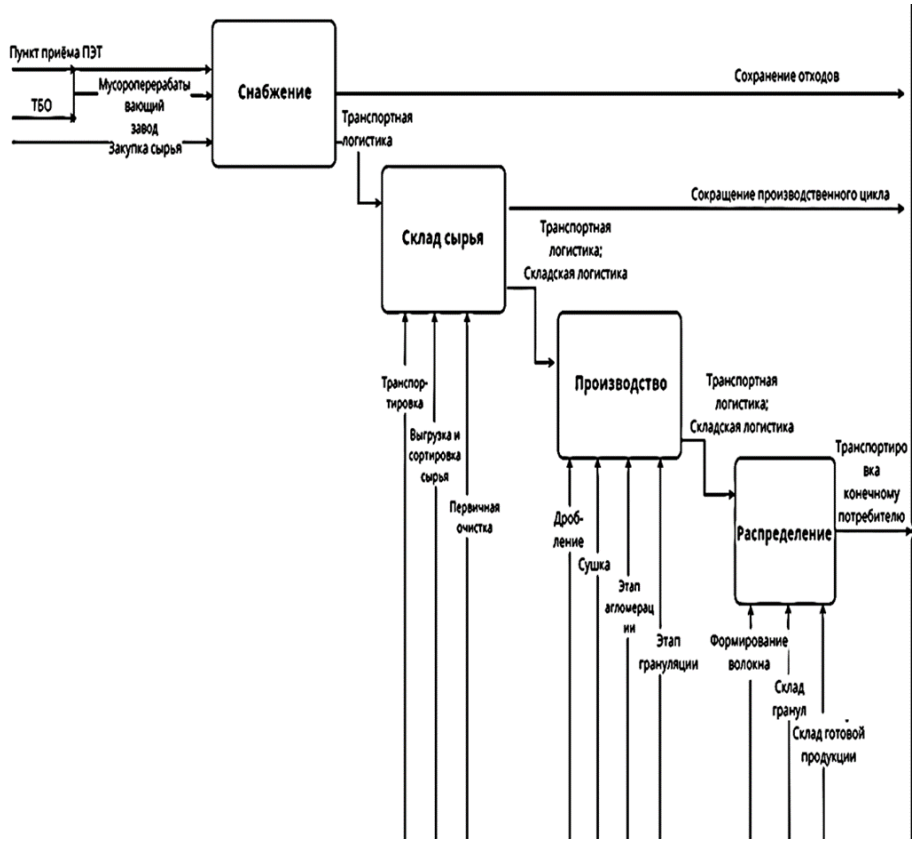


Рисунок 2 — Логико-информационная модель бизнес-процесса получения полиэфирных волокон из ПЭТ бутылок

Выводы

Показано что наиболее целесообразным видом рециклинга для переработки пластика является механико-химический метод. Рассмотрен технологический процесс производства полиэфирных волокон и нитей из ПЭТ бутылок с использованием отечественного оборудования - линии по переработке ПЭТ бутылок в ПЭТ флекс и производства полиэфирного волокна из него. Предложена логико-информационная модель бизнес-процесса получения полиэфирных волокон из вторичного ПЭТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Керницкий В.И., Жир Н.А. Переработка отходов полиэтилентерефталата // Полимерные материалы. Вып. 8. 2014. С.11-20.

2. Линкин М.С., Пожидаева С.А., Стрельников В.В., Кужаров А.А., Любченко С.Н., Данюшина Г.А., Шишка В.Г. Рециклинг полиэтилентерефталата // Известия вузов Сев. -Кав. р-н. Технические науки. 2020. № 4. С. 1-4.

3. Dzhabarov, G.V., Sapunov, V.N., Shadrina, V.V. et al. A kinetic study on the depolymerization of polyethylene terephthalate waste with crude glycerol // Chern. Pap. 2021. Vol. 75 (11). P.6035-6046.

4. Айзентштейн Э.М. Отходы бутылок - в текстильные нити // Химические волокна. 2015. №5. С. 3-7.

5. Одинцов А.В. Проект линий по вторичной переработке полимерных материалов и выпуску изделий на их основе. Киров, 2021. 107 с.

6. Gergely A., Kantor J., Bitay E., Biro D. Electrospinning of polymer fibres using recycled PET // Acta Materialia Transylvanica. 2019. V.2/1. P. 19-26.

7. Рыбаков Е.А., Стариков Д.П. Разработка и внедрение алгоритма «ADAPTIVE PID» для экструзии пластика // НИТПУ. Томск. 2014.С. 56-59.

8. Производство ПЭТ-волокон из пластмассовых бутылок и нетканых полотен на их основе // Легкая промышленность. КУРЬЕР. 2017. №3

9. Линия переработки ПЭТ-бутылок во флексу// «Подольский завод оборудования» [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://p-z-o.com/contacts

10 Линии для переработки ПЭТ бутылок // ПОЛИМЕХ [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://polimech.ru

11. Комплекс оборудования для переработки ПЭТ бутылок //STANKOPET

[Электронный ресурс]. Режим доступа: https://stankopet.ru/complexes/kompleks-oborudovaniya-dlya-pererabotki-pet.

12. Одностадийная линия для производства полиэфирного волокна //Астат

[Электронный ресурс]. Режим доступа: https://astat85.ru/odnostadiynayaliniya-dlya-proizvodstva-poliefirnogo-volokna

13. Создание графической программы IDEF0 [Электронный ресурс] Режим доступа: https://support.microsoft.com/ru

УДК 620.22 DOI: 10.37816/eeste-2024-1-327-330

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ МОДИФИКАЦИИ ЙОДОМ НА СТРУКТУРУ И ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ГРАФЕНОВЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ
STUDY OF THE INFLUENCE OF IODINE MODIFICATION CONDITIONS ON THE STRUCTURE AND ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF GRAPHENE NANOMATERIALS

Николай Андреевич Чапаксов, Роман Александрович Столяров, Татьяна Петровна Дьячкова
Nikolay A. Chapaksov, Roman A. Stolyarov, Tatyana P. Dyachkova

Тамбовский государственный технический университет, Россия, Тамбов
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(e-mail: tchapaxov.nikolaj@yandex.ru, stolyarovra@mail.ru, dyachkova_tp@mail.ru)

Аннотация: Проведено исследование структуры и свойств графеновых нанопластинок, модифицированного йодом в различных концентрациях. Измерение электропроводности показывает значительный ее рост для графеновых нанопластинок с 1,14 до 15,9 см/см при концентрации йода 3 масс.%. Полученные результаты открывают возможность применения модифицированных йодом наноматериалов в качестве компонентов для создания электропроводящих антистатических полимерных композитов.

Abstract: A study was carried out of the structure and properties of graphene nanoplatelets modified with iodine in various concentrations. Electrical conductivity measurements show a significant increase for graphene nanoplatelets from 1.14 to 15.9 cm/cm at an iodine concentration of 3 wt.%. The results obtained open up the possibility of using iodine-modified nanomaterials as components for creating electrically conductive antistatic polymer composites.

Ключевые слова: наноматериалы, графеновые нанопластинки, йод; структура; электропроводность.

Keywords: nanomaterials, graphene nanoplates, iodine; structure; electrical conductivity.

Одним из наиболее изученных наноматериалов на сегодняшний день является графен и его производные. Он имеет большую площадь удельной поверхности, высокую электропроводность, подвижность носителей заряда, а также уникальные механические свойства. Химически модифицированные формы графена открывают возможность управления целым рядом его функциональных свойств и обеспечивают возможность его широкого применения в различных приложениях [1].

Большой интерес вызывает подкласс галогенизированных графенов, поскольку, варьируя тип и концентрацию галогена в нем можно регулировать ширину запрещенной зоны, а также управлять электронными, электрическими, электрокаталитическими и химическими свойствами как самих производных графена, так и нанокомпозиционных полимерных материалов на их основе [2]. Среди галогенов часто выделяют бор, использование которого открывает новые функциональные свойства для альтернативных энергетических устройств и технологий [3]. Однако, применение легированного йодом графена в топливных элементах позволяет осуществить важную реакцию восстановления кислорода, что обеспечивает его основное преимущество по сравнению с остальными галогенами [4]. Значительный интерес, вызванный к I-легированным графенам, обусловлен его повышенной электропроводностью, а следовательно, возможностью применения в электропроводящих антистатических полимерных материалах.

Для исследований был использован углеродный наноматериал «Таунит-ГМ» производства ООО "НаноТехЦентр" г. Тамбов, полученный посредством модифицированного метода Хаммерса. Наноматериал «Таунит-ГМ» представляет собой двумерные графеновые

пластины толщиной до 15 нм в виде водной пасты, содержание графена составляло 5 масс.% Структура «Таунит-ГМ» представлена на рисунке 1.

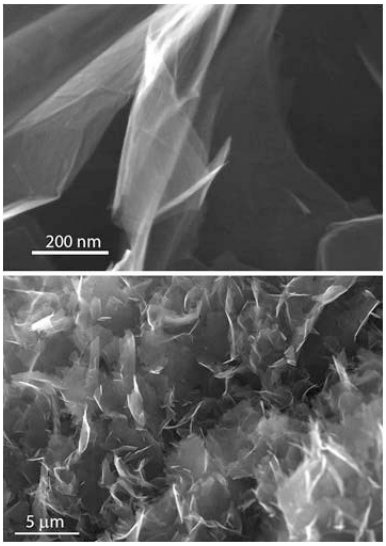


Рисунок 1 — СЭМ-изображения графеновых нанопластинок «Таунит ГМ»

Характеристики водной пасты графеновых нанопластинок представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики наноматериала «Таунит ГМ»

Параметр	Малослойные ГНП
Число графеновых слоев	3 - 5
Толщина нанопластин, нм	2 - 3
Размер нанопластин в плоскости, мкм	2 - 10
Содержание нанопластин, масс.%	10 - 12
Содержание кислорода, масс.%	9 - 13
Содержание серы, масс.%	≤0,7
Удельный коэффициент поглощения, л/(г·см)	58 - 63

Методика получения, модифицированного йодом графена состояла из следующих этапов. Водная паста «Таунит-ГМ» высушивалась при нормальных условиях и механоактивировалась в дезинтеграторе WF-20B (Yueyuehong, Zhejiang, Китай), для получения сухого порошкообразного графена. Порошок смешивали с кристаллическим йодом. Концентрация йода составляла 10 масс.% Затем смесь помещали в герметичный стеклянный контейнер и нагревали до 120 °С, где выдерживали не менее 1 часа. Образец имел маркировку – ГМ-1.

Методика жидкофазного модифицирования йодом графеновых нанопластинок заключалась в смешении 5% графеновой водной пасты с 10 и 20 % раствором йода в изопропаноле (навеска компонентов выбиралась, так чтобы концентрация йода составила 10 и 20 % масс. йода относительно сухого графена). Смешение осуществляли на механической мешалке Witeg HT-50AX (DAIHAN Scientific, Корея) в течение 5 мин при 800 об/мин. На следующем этапе смесь высушивалась и механоактивировалась в дезинтеграторе WF-20B, для получения сухого порошкообразного йодированного графена. Полученные образцы имели маркировку ГМ-2 и ГМ-3 соответственно.

Концентрацию йода в контрольном и модифицированных образцах графеновых нанопластинок измеряли посредством энергодисперсионного рентгенофлуоресцентного спектрометра ARL QUANT (Thermo Fisher Scientific, США). Результаты измерений представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Концентрация йода в модифицированных графеновых нанопластинках

Образец	Концентрация йода при модификации, масс.%	Концентрация йода в модифицированном образце I, масс.%
Графеновые нанопластинки «Таунит-ГМ»	0	0
ГМ-1	10	1,7
ГМ-2	10	1,5
ГМ-3	20	3,0

Как видно из таблицы 2, конечная концентрация йода практически не отличается для образцов ГМ-1 и ГМ-2, полученных различными методами.

Для детального исследования изменения в структуре модифицированных образцов использован метод рентгенофазового анализа (РФА) на приборе ARL Equinox 1000 (Thermo Fisher Scientific, США). Подготовленный образец оксида графена подвергают воздействию монохроматического рентгеновского пучка. Пучок рентгеновских лучей, попадая на образец, отражается от системы плоскостей с кристаллографическими индексами (001), характеризующими расположение атомных плоскостей.

На рисунку 2 изображены дифрактограммы исходных и модифицированных образцов графеновых нанопластинок «Таунит-ГМ».

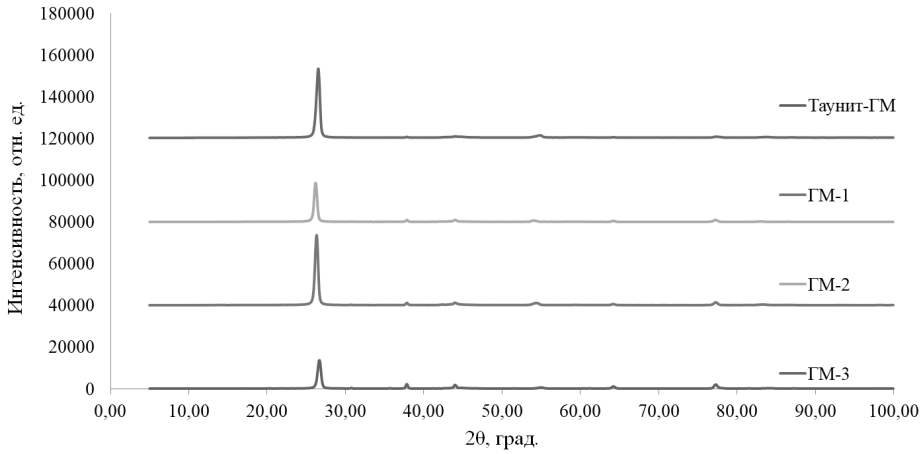


Рисунок 2 — Дифрактограммы модифицированных образцов графена и исходных графеновых нанопластинок «Таунит-ГМ»

Значительных изменений по данным РФА в структуре графеновых нанопластинок при их модификации галогеном из газовой фазы обнаружено не было. Наблюдается незначительное изменение положения пика при 26°, а также его интенсивности, что может быть связано с качеством подготовки образца.

Спектры комбинационного рассеяния (КР) были получены на приборе Thermo Scientific DXR Raman Microscope (Thermo Fisher Scientific, США) с длинной волны возбуждающего лазера 532 нм. Результаты анализа представлены на рисунке 3.

Результаты КР-спектроскопии модифицированных образцов не показывают каких либо изменений в структуре графеновых нанопластинок. Также данным методом не зафиксировано наличия следов йода в модифицированных образцах.

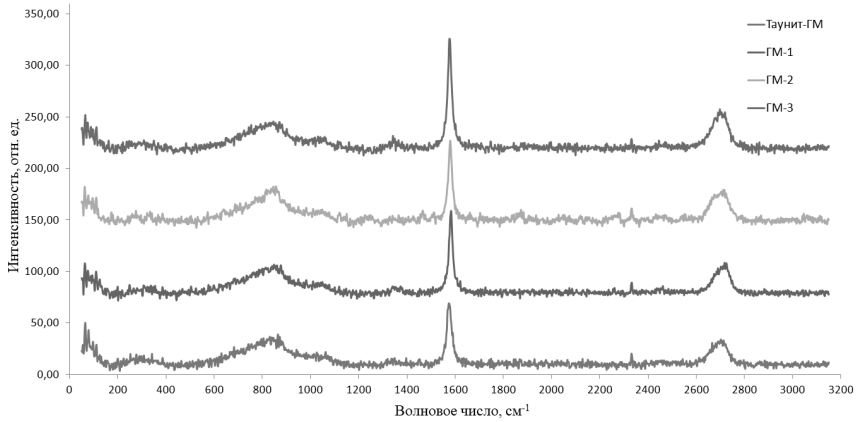


Рисунок 3 — Рамановские спектры графеновых нанопластинок.

Измерение электропроводности проводилось при помощи четырехзондового измерителя электрического сопротивления Jandel RM-3000 (Jandel Engineering, Великобратания). Результаты измерения представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Электропроводность модифицированных графеновых нанопластинок.

Образец	Удельное объемное сопротивление, Ом·см	Электропроводность, См/см
Графеновые нанопластинки «Таунит-ГМ»	0,879	1,14
ГМ-1	0,718	1,39
ГМ-2	0,0928	10,8
ГМ-3	0,0628	15,9

Как видно из таблицы модифицированные йодом образцы ГМ-2 и ГМ-3 имеют большую электропроводность по сравнению с контрольным, что вероятно связано с адсорбированным йодом на их поверхности. Однако, образец ГМ-1, полученный посредством сорбции галогена из газовой фазы не показал значительного ухудшения электропроводности по сравнению с исходным образцом.

Выводы

В результате проведенного исследования модифицированных йодом образцов графена методами рамановской спектроскопии и рентгенофазового анализа изменений в структуре обнаружено не было. Однако, элементный анализ, показал наличие йода в модифицированных образцах графеновых нанопластинок, вероятно, адсорбированный на их поверхности. Также, данные электрической проводимости показывают ее рост более чем в 10 раз при концентрации йода 3 масс.%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jingzhong L., Shuping C., Yanan L., Bijing Z. Progress in preparation, characterization, surface functional modification of graphene oxide: A review // Journal of Saudi Chemical Society. 2022. Т. 26. № 6. С. 101560.

2. Nazrul Islam K., Sudipta H., Nabajyoti T., Subhankar D., Goyat M.S. Surface oxidized/silanized graphite nanoplatelets for reinforcing an epoxy matrix // Materials Chemistry and Physics. 2021. Т. 258. С. 123851.

3. Jorge Pavel Victoria Tafoya, Doszczeczko S., Titirici M.M., Jorge Sobrido A.B. Enhancement of the electrocatalytic activity for the oxygen reduction reaction of boron-doped reduced graphene oxide via ultrasonic treatment // International Journal of Hydrogen Energy, 2022. Т. 47. №. 8, С. 5462-5473.

4. Omer A., Adhikari S., Adhikary S., Rusop M., Uchida H., Soga T., Umeno M. Electrical conductivity improvement by iodine doping for diamond-like carbon thin-films deposited by microwave surface wave plasma CVD // Diamond and Related Materials. 2006. Т. 15. №. 4. С. 645-648.

УДК 685.34.08 DOI: 10.37816/eeste-2024-1-331-335

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ВОЛОКНИСТО-НАПОЛНЕННЫХ ПОЛИУРЕТАНОВЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА
STRUCTURE AND PROPERTIES OF FIBER-FILLED POLYURETHANE COMPOSITES ON THE BASIS OF INDUSTRIAL WASTES

Анастасия Николаевна Радюк, Александр Николаевич Буркин
Anastasia Radyuk, Alexander Burkin

Учреждение образования «Витебский государственный технологический университет», Республика Беларусь, Витебск
Vitebsk State Technological University, Republic of Belarus, Vitebsk
(e-mail: ana.r.13@mail.ru)

Аннотация: Рассмотрено получение волокнисто-наполненных полиуретановых композитов, позволяющих заменить материалы типа кожволон, приведены результаты экспериментального исследования свойств полученных материалов, проанализирована их структура.

Abstract: The production of fiber-filled polyurethane composites, which allow to replace the materials of leatherwoolon type, is considered; the results of experimental study of the properties of the obtained materials are given, their structure is analyzed.

Ключевые слова: древесные волокна, наполнитель, композит, технология, свойства, структура.

Keywords: wood fibers, filler, composite, technology, properties, structure.

Одно из приоритетных направлений развития промышленности Республики Беларусь состоит в том, чтобы обеспечить выпуск качественной и конкурентоспособной продукции за счет снижения ресурсоемкости изделий и создания современных инновационных полимерных материалов. Снижение ресурсоемкости изделий возможно в результате рационального использования вторичных ресурсов.

В настоящее время в связи с быстрым развитием современной науки и техники необходимо применение новых полимерных материалов со специальными свойствами. В связи с этим основным вариантом решения возникающих материаловедческих проблем является разработка и получение полимерных композитов.

Согласно [1] одним из основных видов полимерных композитов являются материалы, содержащие полимер и любые твердые частицы или волокна, в том числе наночастицы. Поэтому одним из путей расширения ассортимента полимерных композиционных материалов можно рассматривать различные варианты их варианты.

Применительно к легкой промышленности и, в частности, к обувной отрасли композиции с волокнистыми наполнителями можно относить к кожеподобным материалам, наиболее известным из которых являются материалы типа кожволон, релак. Согласно [2] кожволон или кожеподобная резина представляет собой полимерную матрицу, армированную вискозными волокнами до 5 мас. % и обладает высокими показателями физико-механических свойств.

На сегодняшний день особый интерес для использования в качестве армирующих волокон, благодаря своей низкой плотности, высоким значениям удельной прочности и модуля Юнга, а также низкой стоимости, представляют волокна, получаемые из древесины [3].

Как известно на предприятиях деревообрабатывающей отрасли древесина используется не на 100 %, поэтому в ходе технологического процесса образуются отходы деревообработки разной конфигурации и размера, в том числе коротковолокнистые. Использование малоразмерных волокон (с размером частиц до 1210 мкм) в качестве наполнителя для

получения полимерных композиционных материалов позволит решить проблему их утилизации и получить материалы типа кожволон.

Необходимо отметить, что в Республике Беларусь отсутствуют предприятия, выпускающие материалы типа кожволон и другие полимерные материалы для низа обуви, весь объем материалов либо закупается в дружественных странах, либо изготавливается из приобретенного сырья. Научные сотрудники УО «ВГТУ» уже не одно десятилетие занимаются разработкой рецептурных составов и технологий получения материалов и подошв обуви, используя в качестве основного компонента – матрицы композиции – отходы обувных пенополиуретанов (ППУ) [4–6].

В связи со сказанным выше целью данной работы является получение материала типа кожволон, представляющего собой полиуретановую матрицу, армированную древесными волокнами до 5 мас. % и исследование его структуры и свойств.

В качестве основного компонента композитов использовали вторичное полимерное сырье – отходы пенополиуретана (ППУ) обувных предприятий г. Витебска, в качестве наполнителя – просушенное древесное волокно, полученное путем разделения измельченной и пропаренной технологической щепы на отдельные волокна. Для повышения технологичности переработки в композицию добавляли масло трансмиссионное TAD17 и стеарат кальция.

На основании данных, приведенных в [7], полиуретановую матрицу модифицировали отходами стелечного картона, взятом в минимальном количестве 3 мас. %. Это позволило предположить использовать такое же количество наполнителя, так как точного состава материала типа кожволон нет.

На основе анализа вариантов технологий производства материалов и изделий для деталей низа обуви с использованием отходов полиуретанов, основанных на многочисленных исследованиях сотрудников УО «ВГТУ» по данной проблеме, разработана технология получения материалов (пластин обуви) на полимерной матрице из полиуретана, армированной древесными волокнами (рисунок 1).

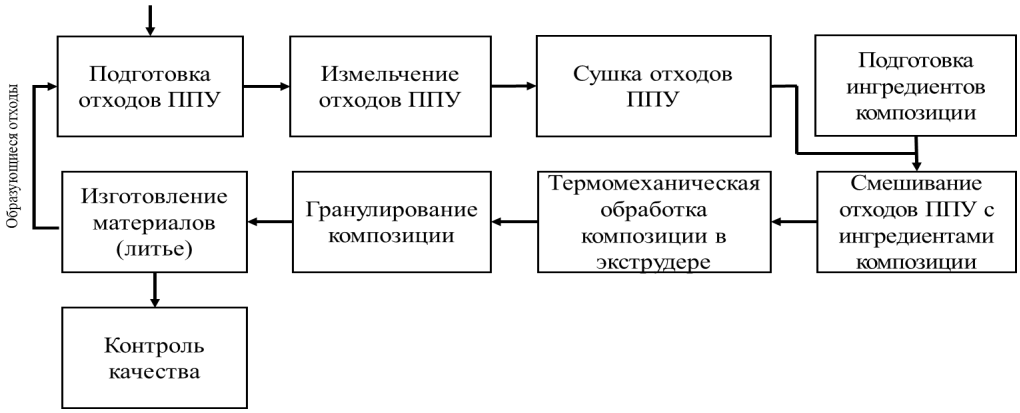


Рисунок 1 — Технология получения материалов (пластин обуви) на полимерной матрице из полиуретана, армированной древесными волокнами

Первый этап проводится с целью сортировки отходов ППУ по внешнему виду либо разделения по группам, а также включает взвешивание отходов ППУ.

Второй этап позволяет унифицировать свойства разнообразных по форме, размерам и специфическим характеристикам отходы ППУ и осуществляется с помощью дробилки роторно-ножевого типа до размеров частиц 10–15 мм.

Далее измельченный ППУ сушили в сушильной камере или термошкафу с принудительной конвекцией воздуха при температуре 80 ºС в течение 3 часов до влажности 0,2–0,3 %.

Одновременно с предыдущей операцией подготавливали ингредиенты композиции – пластификатор, стабилизатор и наполнитель, а также проводили их взвешивание согласно рецептурному составу.

Высушенные частицы отходов ППУ и ингредиенты композиции смешивали между собой в лопастной мешалке.

Полученную композицию подвергали термомеханической переработке в двухшнековом экструдере SUPLAST 25/2 мм (ООО «СуПласт», РБ) при температуре переработки 110–185 ºС и скорости вращения шнека 50 об/мин с получением стренгов диаметром 3 мм.

Непосредственно перед гранулированием полуфабрикат охлаждали в ванне и измельчали до получения гранул длиной 2–4 мм.

Заключительным этапом технологического процесса использования отходов является изготовление композиционных материалов на термопластавтомате «ТП EN30» («Hengsen», Китай) при температуре 170–190 ºС.

Контроль качества включал проверку материалов (пластин) по внешнему виду, а также их сортировку и упаковку.

Полученные материалы (пластины) исследовали по показателям свойств, представленным в таблице 1. Также в таблице представлены результаты проведенных испытаний.

Таблица 1 — Физико-механические показатели свойств материалов для низа обуви

Наименование показателя, обозначение, ед. измерения	ТНПА	Применяемые средства измерения, оборудование	Физический смысл показателя	Результат	
Плотность (ρ), г/см^3	ГОСТ 267-73	Аналитические весы XS204, Mettler Toledo, США	отношение массы образца к объему вытесненной им жидкости	К, n=3	1,19
Твердость (Н), усл. ед.	ГОСТ 263-75	Твердомер ТМ-2	сопротивление образцов погружению в них индентора	К, m=3	91
Абразивный износ (V_i), мм^3/м	ГОСТ 11012-2017	Тестер абразивного износа APG-300, «Fritz Heckert», ГДР	уменьшение объема образца	К, n=3	1,167
Относительное удлинение (ε), %	ГОСТ 11262-80	Измерительный комплекс Instron 5567 программным обеспечением Merlin, «Instron», Великобритания	–	К, m =5	263,02
Предел прочности (σ), МПа					12,60
Модуль упругости (Е), МПа					12,04

К – среднее арифметическое, n – количество образцов, m – количество опредлений

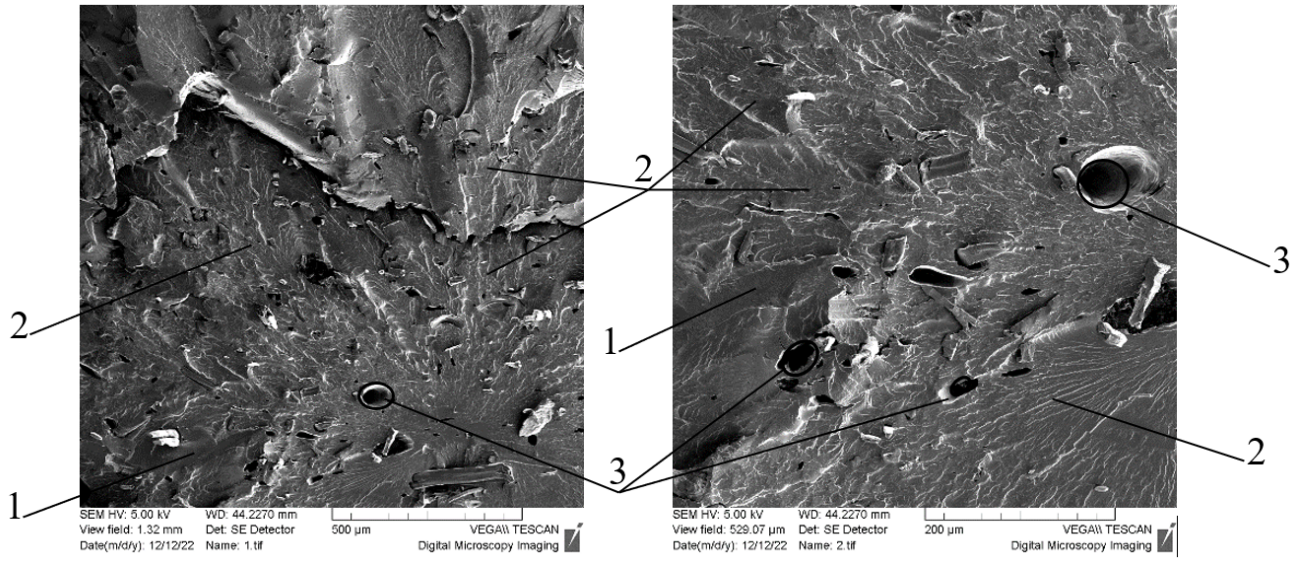
Сравнивая полученные результаты с исходным гранулятом отходов ППУ необходимо отметить, что наполнение и модификация отходов обувных ППУ позволяет незначительно увеличить упруго-прочностные характеристики, повысить износоустойчивость материалов и их твердость, при этом способствуя снижению плотности материала.

Сравнивая полученные материалы с материалами типа кожволон можно заметить, что в некоторых источниках данных отличаются требования их физико-механических свойств [8, 9]. Верхний предел плотности составляет 1,2 г/см^3 (для кожеподобной резины релак – 1,3 г/см^3), предел прочности должен быть не менее 6,5 МПа, нижний предел относительного

удлинения при разрыве составляет 180 %, твердость по Шору А должна быть 80–95 усл. ед., модуль упругости и абразивный износ не входят в перечень регламентированных показателей. Согласно этим данным, полученные материалы соответствует требованиям верхних границ показателей и значительно превосходят нижние пороговые значения.

Результаты анализа свойств дополнены анализом структуры полученных материалов.

Структуру поверхности композитов изучали методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на срезах образцов на микроскопе «Vega II» («Tescan», Чехия). На рисунке 2 представлены две фотографии СЭМ-изображения волокнисто-наполненного полиуретанового композита, выбранные случайным образом.



а б

Рисунок 2 — СЭМ-изображения композита: а – при увеличении 500 нм, б – при увеличении 200 нм; 1 – полиуретановая матрица, 2 – древесные волокна, 3 – оставшиеся поры

СЭМ-анализ срезов исследуемых композитов показывает, что волокна распределены случайным образом в хаотическом направлении. На поверхности образцов можно заметить отдельные участки волокон, их скопление, пустоты материала и оставшиеся поры исходного ППУ. Несмотря на это установлена адгезия между волокнистым наполнителем и исходной матрицей, что говорит о возможности такого применения компонентов композиции.

В заключение статьи следует отметить, что наполнители в виде древесных волокон можно рассматривать как модифицирующие добавки к полиуретановым матрицам. Это позволяет получить материалы волокнисто-наполненной структуры, повысить показатели некоторых физико-механических характеристик и открыть путь к широкому повторному использованию (т.е. рециклингу) отходов обувных полиуретанов. Оптимальная степень наполнения может быть разной для разных видов отходов ППУ. В работе представлено наполнение вт. ППУ в количестве 3 мас. % древесного волокна практически не отличаются по комплексу физико-механических характеристик от исходного вт. ППУ.

Выводы

Проведено экспериментальное исследование получения волокнисто-наполненного полиуретанового композита, исследована его структура, физико-механические и триботехнические характеристики и сделан вывод о его соответствии по структуре и свойствам материалам типа кожволон.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гольдаде В.А. [и др.] Материаловедение и технология полимерных композиционных материалов: учебное пособие. Гродно: ГрГУ, 2018. 351 с.

2. Буркин, А.Н. [и др.] Материаловедение кожевенно-обувного производства. М.: Беларус. Энцыкл. імя П.Броўю, 2011. 310 с.

3. Industrial Applications of Natural Fibres: Structure, Properties and Technical Applications. / Ed. by J. Mussig. Chichester: Wiley, 2010.

4. Буркин А.Н. [и др.] Переработка твердых отходов обувных предприятий г. Витебска: монография. Витебск: УО «ВГТУ», 2000. 118 с.

5. Буркин А.Н. [и др.] Обувные материалы из отходов пенополиуретанов: монография. Витебск: УО «ВГТУ», 2001. 173 с.

6. Материалы для подошв обуви на основе отходов производства: монография / Под общ. ред. Буркина А.Н. Витебск: УО «ВГТУ», 2022. 319 с.

7. Композиция для деталей низа обуви : пат. BY 5190 / А. Н. Буркин, Г. С. Энтин, К. С. Матвеев. – Опубл. 30.06.2003.

8. Морозова Л.П. [и др.] Справочник обувщика (Проектирование обуви, материалы). Москва.: Легпромбытиздат, 1988. 432 с.

9. Карабанов П.С., Жихарев А.П., Белгородский В.С. Полимерные материалы для деталей низа обуви. Москва.: КолосС, 2008. 167 с.

УДК 544.777 DOI: 10.37816/eeste-2024-1-336-338

ТЕРМООБРАТИМЫЕ ГИДРОГЕЛИ ПОЛИСАХАРИДОВ МОРСКИХ ВОДОРОСЛЕЙ ДЛЯ ЭКСТРУЗИОННОЙ 3Д-ПЕЧАТИ
THERMOREVERSIBLE HYDROGELS OF SEAWEED POLYSACCHARIDES FOR EXTRUSION 3D-PRINTING

Василина Александровна Захарова, Наталия Рустемовна Кильдеева
Vasilina A. Zakharova, Natalyia N. Kildeeva

Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), Россия, Москва
The Kosygin State University of Russia, Russia, Moscow
(e-mail: vasilinaqss@gmail.com; kildeeva@mail.ru)

Аннотация: В статье представлен обзор возможностей использования гидрогелей полисахаридов в качестве "чернил", соответствующих технологическим требованиям аддитивного производства, а также новые экспериментальные данные в области изучения температурно-индуцированного гелеобразования в водных растворах полисахаридов водорослей, позволившие управлять структурой и свойствами гидрогелей, что открывает перспективы их успешного использования для создания инновационных гидрогелевых чернил для 3Д-печати.

Abstract: The article provides an overview of the possibilities of using polysaccharide hydrogels as "inks" corresponding to the technological requirements of additive manufacturing, as well as new experimental data in the field of studying temperature-induced gel formation in aqueous solutions of algal polysaccharides, which made it possible to control the structure and properties of hydrogels, which opens prospects for their successful use to create innovative hydrogel inks for 3D printing.

Ключевые слова: полисахариды водорослей, агар, гидрогели, гидрогелевые чернила, экструзионная 3Д-печать.

Keywords: algae polysaccharides, agar, hydrogels, hydrogel ink, extrusion 3D printing.

3Д-печать, или аддитивное производство, является высокотехнологичным процессом прототипирования объектов любой конструкционной сложности путем наслоения материала согласно исходному g-коду [1]. Аддитивные технологии уже сегодня широко используются в секторах легкой промышленности и медицины, позволяя создавать персонализированные конструкции и многократно воспроизводить инновационные изделия. В медицине аддитивные технологии играют ключевую роль при создании имплантатов, прототипов искусственных органов, матриксов для тканевой инженерии и других изделий. В области тканевой инженерии, наибольший интерес представляет возможность использования в качестве «чернил» гидрогелей и/или концентрированных растворов биосовместимых полимеров, удовлетворяющих технологическим требованиям аддитивного производства. Полимерные гидрогели, т.е. высокогидратированные полимерные сетки, являются одним из наиболее подходящих видов чернил для создания печатных каркасов матричного типа, поскольку они подобно природному внеклеточному матриксу влияют на жизнеспособность клеток [2]. Печать гидрогелями с целью получения функциональных медицинских изделий обладает большим потенциалом, позволяя формировать эквиваленты тканей и органов, пригодные для трансплантации. Кроме того, гидрогелевые материалы могут быть наполнены биологически активными веществами для их направленного и контролируемого высвобождения в организме, тем самым повышая эффективность терапии и снижая риски возникновения локальных воспалительных реакций [3].

Техника экструзионной 3D-печати заключается в послойном ламинарном нанесении раствора и расплава полимера через движущееся сопло, исполняющее функцию печатающей

головки. Для нанесения следующего печатного слоя, по завершению предыдущего, возможна подача головки экструдера вверх или же спуск рабочей платформы вниз на заданную толщину слоя (Рис.1) [4].

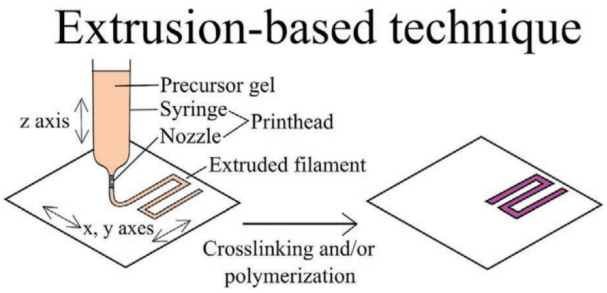


Рисунок 1 — Схема экструзионной 3D-печати [4].

При этом существенное значение имеет реокинетика процесса перехода концентрированный раствор полимера (псевдопластическая жидкость) – гидрогель (упругое тело). Экструдируемый раствор поначалу должен быть либо вязкоупругим, либо вязким и только на рабочей платформе, перед нанесением последующих рядов, утрачивать способность к течению и образовывать упругий гель. Несвоевременное гелеобразование материала, содержащегося в принтере, предупреждается временным контролем гелеобразования.

Наибольший интерес для использования в качестве «чернил» для экструзионной 3D-печати биополимерных матриц представляют термообратимые полисахариды красных и бурых водорослей, такие как агароза, и каррагинаны, обладающие верхней критической температурой растворимости, характеризующей золь-гель переход при охлаждении [5] и способные к формированию прочного геля.

В основе процесса гелеобразования в растворах полисахаридов лежат механизмы, вызывающие формирование стабильной или термообратимой трехмерной сетки, причем характер и число узлов сетки зацеплений определяет реологические и механические свойства геля. Для технологии 3D-печати важным является определить условия, при которых раствор полимера проявляет способность к течению, но обладает значительной вязкостью и может использоваться в качестве печатных «чернил», и параметры перехода к упругому телу матрикса [6]. Печатные «чернила» должны послойно накладываться друг на друга без слияния, а гелеобразование должно моментально происходить после экструзии, во избежание блокировки сопла, путем его закупоривания.

В настоящей работе разработаны технологические подходы и осуществлен поиск путей модификации термообратимых гидрогелей на основе полисахаридов водорослей с целью использования в качестве универсальных печатных гидрогелевых чернил и филаментов, в экструзионных FDM-установках для создания изделий с заданными геометрическими параметрами. В докладе рассмотрены основные задачи в области управления процессом гелеобразования в термообратимых полимерных системах на основе растворов нейтральных и ионогенных полисахаридов. Решение этих задач требует комплексного подхода как в отношении целенаправленного выбора состава высокогидратированных композитных и гибридных полимер-матричных материалов, так и дополнительного воздействия на формирование системы взаимодействий в гидрогелевой матрице, так и получения заданного уровня упругих свойств.

С целью определения возможностей воздействия на процесс гелеобразования исследована кинетика изменения вязко-упругих свойств и механизм гелеобразования в растворах агара (рис. 2), каррагинана и некоторых других термообратимых полисахаридов в процессе охлаждения и установлены температурно-концентрационные диапазоны, определяющие формирование устойчивой системы водородных связей, ответственных за упругие свойства гидрогелей.

Процесс печати гидрогелевыми чернилами на основе растворов агара, каррагинана и альгината натрия разной концентрации (Рис.3) был выполнен на поршневом 3D-принтере предоставленном компанией PharmPrint, Россия.

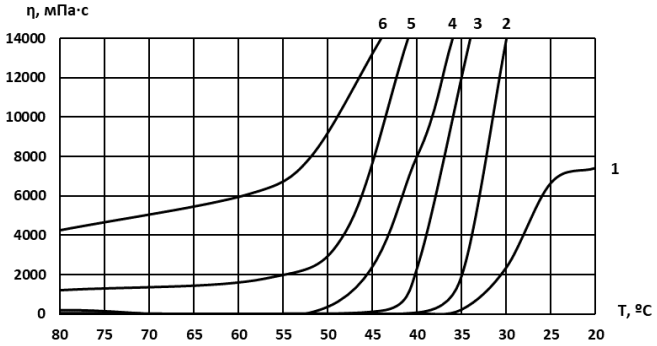


Рисунок 2 — Кривые охлаждения водных растворов агар-агара различной концентрации, %: 1 – 0,25; 2- 1; 3- 1,5; 4 – 2,5; 5 – 3,5; 6 – 5.

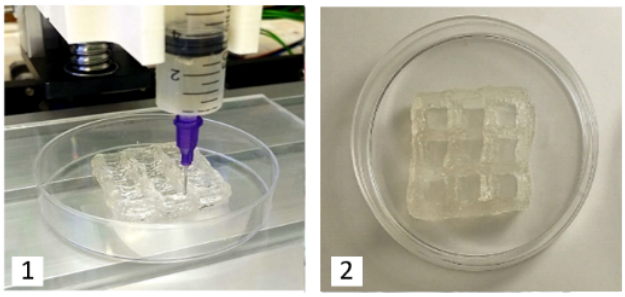


Рисунок 3 — Процесс печати 10-ти слойного каркаса горячими «чернилами» (1); охлажденный 10-слойный каркас (2) [7].

Выводы

Предложенный подход к адаптации гидрогелей полисахаридов к возможностям аддитивных технологий позволил реализовать метод экструзионной поршневой 3D-печати термообратимыми и структурированными высокогидратированными системами на основе полисахаридов водорослей, что открывает новые перспективы для проектирования и производства трехмерных искусственных матриксов с топографической, биологической и биомеханической совместимостью с живыми тканями.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, проект № 24-23-00390.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rais M. H., Li Y., Ahmed I. Spatiotemporal G-code modeling for secure FDM-based 3D printing //Proceedings of the ACM/IEEE 12th International Conference on Cyber-Physical Systems. 2021. С. 177-186.

2. Chen Z. et al. 3D printing of multifunctional hydrogels //Advanced Functional Materials. 2019. Т. 29. №. 20. С. 1900971.

3. Varaprasad K. et al. The significance of biomacromolecule alginate for the 3D printing of hydrogels for biomedical applications //International Journal of Biological Macromolecules. 2022. Т. 212. С. 561-578.

4. Champeau M. et al. 4D printing of hydrogels: a review //Advanced Functional Materials. 2020. Т. 30. №. 31. С. 1910606.

5. Zhang R., Lv Y., Tan T. Thermoresponsive hydrophobic copolymer grafted on agar microspheres for all-aqueous bioseparations //Journal of separation science. 2019. Т. 42. №. 4. С. 925-932.

6. Kirchmajer, Damian M., R. Gorkin Iii. An overview of the suitability of hydrogel-forming polymers for extrusion-based 3Dprinting. //Journal of Materials Chemistry B 3.20 2015. С. 4105-4117.

7. V.A. Zakharova, P.M. Gotovtsev, P.A. Poletaeva, A.G. Rogov, N.R. Kildeeva. 3D Printing Using Iota-Carrageenan-Based Hydrogel with Immobilized Chlorella vulgaris Microalgae. //Nanobiotechnology Reports. 2023. V 18. №1. С. 91-97.

УДК 677.074 DOI: 10.37816/eeste-2024-1-339-343

ВЛИЯНИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ПРЕДПОДГОТОВКИ ВОЛОКНИСТЫХ СИСТЕМ ПРИ СОЗДАНИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ ГЕТЕРОГЕННЫХ МЕМБРАН МОЗАИЧНОЙ СТРУКТУРЫ СО ВСТРОЕННЫМИ “CORE-SHELL” НАНОЧАСТИЦАМИ

INFLUENCE OF LOW TEMPERATURE ION-PLASMA PRETREATMENT OF FIBROUS SYSTEMS IN THE MANUFACTURE OF COMPOSITE HETEROGENEOUS MOSAIC MEMBRANES WITH EMBEDDED "CORE-SHELL" NANOPARTICLES

Денис Владимирович Терин*,,***, Тимур Алихонович Тураев*,**
Марина Михайловна Кардаш*
Denis V. Terin*,,***, Timur A. Turaev*, Marina M. Kardash***

** Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Россия, Саратов*
** Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Russia, Saratov, (e-mail: m_kardash@mail.ru; tim.tur.al@gmail.com)*
*** Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Россия, Саратов*
*** Saratov State University, Russia, Saratov*
**** МИРЭА – Российский технологический университет, Россия, Москва*
**** MIREA–Russian Technological University, Russia, Moscow (e-mail: terinden@mail.ru)*

Аннотация: Рассмотрены особенности влияния ионно-плазменной обработки на свойства волокнистых систем, технологических особенностей получения и эксплуатационные свойства композиционных гетерогенных мембран мозаичной структуры с встроенными кремниевыми «core-shell» наночастицами.

Abstract: Some features of the influence of ion-plasma treatment on the properties of fibrous systems, technological features of production and operational properties of composite heterogeneous membranes of a mosaic structure with built-in Si “core-shell” nanoparticles were shown.

Ключевые слова: ионно-плазменной обработка, волокнистая система, полимерный композит, армированная ионообменная мембрана, core-shell, наночастица.

Keywords: ion exchange membrane, reinforcing system, composite, reinforced ion-exchange membrane, core-shell and nanoparticle.

Непрерывная необходимость в расширении ассортиментного, видового и стоимостного перечня современных мембран и мембранных материалов [1]. Современный уровень исследований и перспективы развития различных направлений мембранной науки свидетельствуют о значительном росте интереса к получению новых типов мембран [2-4].

Патентный поиск, проведенный с помощью системы Questel [5], позволил подтвердить актуальность и междисциплинарность исследовательских вызовов. Удалось визуализировать превалирование и взаимосвязь технологий и областей применения всего спектра создаваемых мембран. Выявлены численные соотношения количества патентных семей с технологией и областью использований мембран (рис. 1). Во временной ретроспективе количество патентных заявок, начиная с 2010 года непрерывно растет, что позволяет охарактеризовать направление мембранного материаловедение не только как сложившееся, зрелое научное направление, но и как перспективное, технологическое и коммерчески привлекательное.

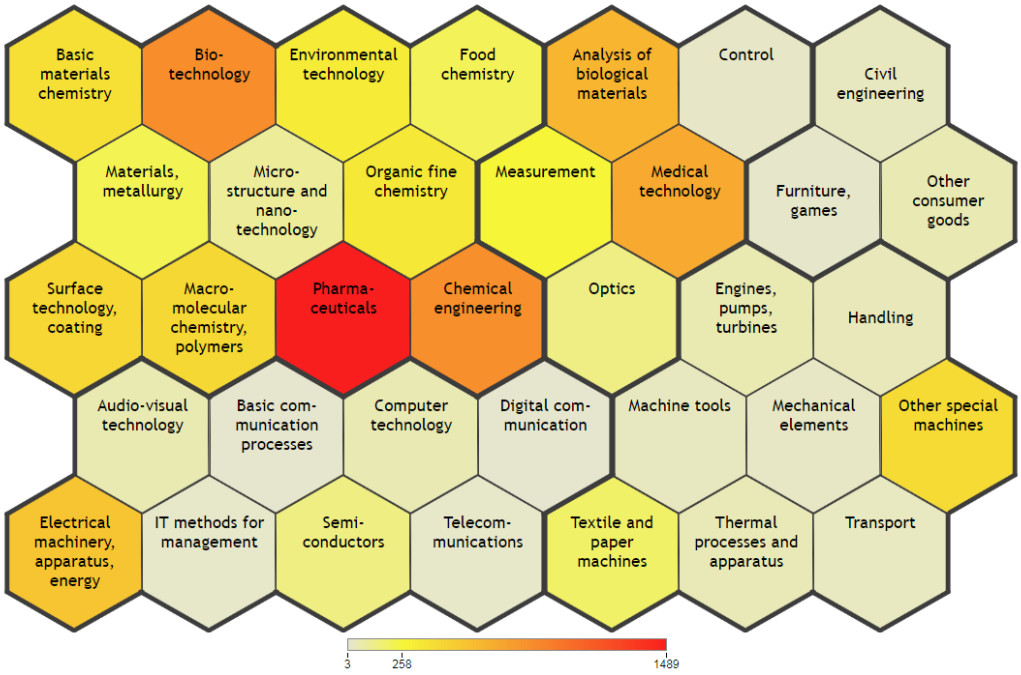


Рисунок 1 — Междисциплинарность и взаимосвязь технологий и областей применения современных мембранных ионообменных материалов.

Исследования, направленные на разработку новых и усовершенствование имеющихся ионообменных материалов с целью улучшения сорбционных характеристик, увеличения продолжительности рабочего цикла, снижения энергоемкости и экологической напряженности входят в приоритетные научные направления. В последнее время востребованными являются мембраны, обеспечивающие селективный перенос ионов с одновременной коррекцией pH растворов.

Такие мембраны работают во многих электромембранных технологиях: получение деонизованной воды, кондиционирование пищевых продуктов, создание водооборотных систем в химической промышленности. Особенностью подобных мембранных систем является возможность регулировать соотношение функций транспорта ионов соли и генерации продуктов диссоциации путем изменения толщины одного из слоев, составляющих биполярную мембрану (рис. 2).



Рисунок 2 — Тенденция инвестиций в мембранные технологии (основано на анализе ~ 1630 патентов за последние 20 лет) при плазменной обработке волокон или поверхности готовых мембран.

Интенсивное развитие мембранной науки и техники, непрерывно расширяющиеся сфера применения мембран, а также синтез новых полимерных структур дают импульс развитию различных методов физико-химической модификации. Одним из подходов к существенному улучшению параметров мембран является низкотемпературная ионоплазменная низкотемпературная обработки [6-8].

Нами была получена опытно-лабораторная партия образцов композиционных гетерогенных мембран мозаичной структуры «Поликон КА» (термин «Поликон» соотносится с разработанным авторами оригинальным технологическим методом получения мембран.

Технологический процесс заключался в предподготовке сырья, приготовлении мономеризационных составов и нанесения их на волокнистую основу, в дальнейшем проводили процесс синтеза и отверждения, тем самым формируя пространственную сетку полимерных матриц на поверхности и в объеме системы.

Особенностью данной работы стала предварительная базовая предподготовка тканей при низкотемпературных ионно-плазменных условиях. Обработка проводилась низкотемпературной ВЧ аргоновой плазмой при мощности 400 Вт в течении 10 минут при давлении 5 10^{-5} мбар (компактная высоковакуумная установка MTI VTC-600-PVD (Южная Корея).

Мембраны «Поликон КА» получали методом поликонденсационного наполнения волокнистой матрицы мономеризационным составом и дальнейшим формированием мозаичной структуры, как на поверхности волокнистой основы, так и в ее структуре.

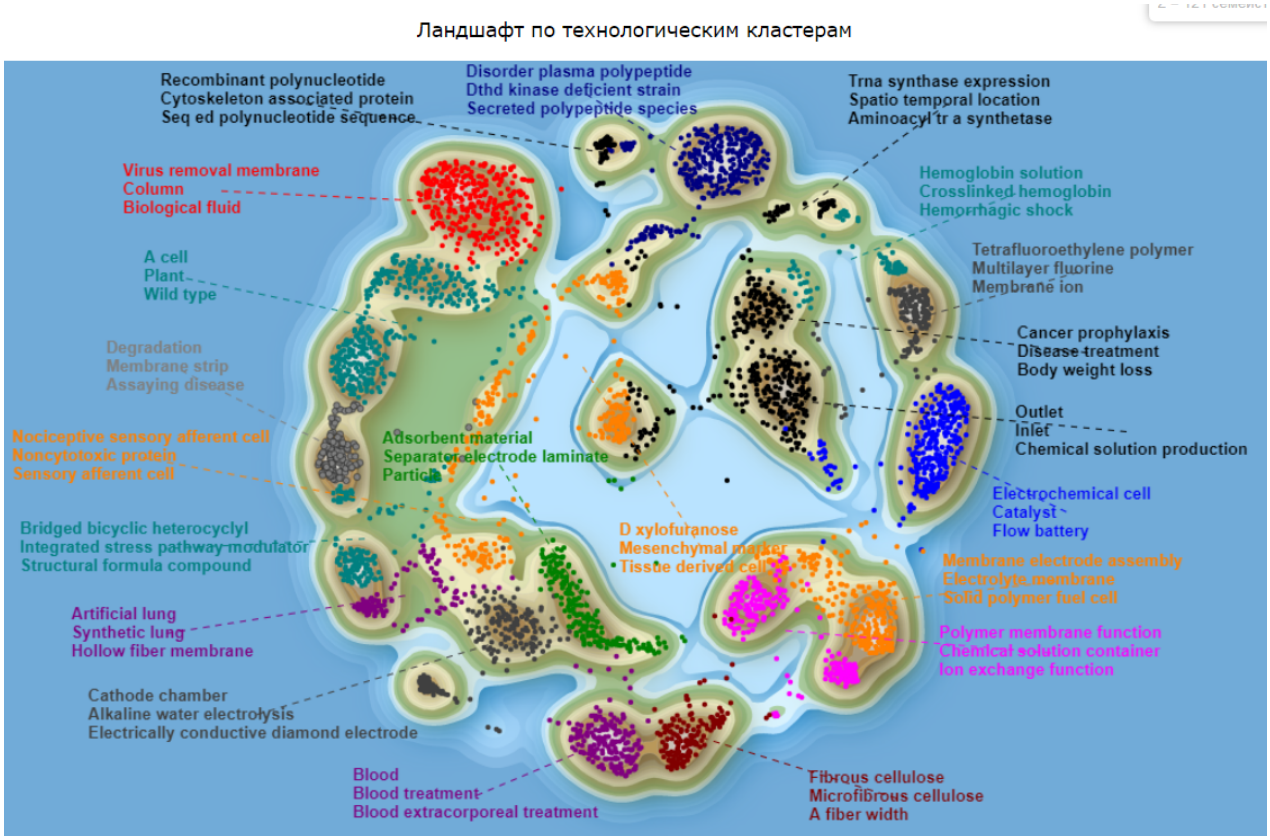


Рисунок 3 — Взаимосвязь технологий получения и областей применения модифицированных в плазме ионообменных материалов.

На этапе формирования мембран в мономеризационный состав добавлялись окисленные наночастицы (не более 1,5 масс.%). В работе использовали ультрадисперсный оксид кремния, полученный по плазменной технологии переконденсацией ультрадисперсных материалов в лаборатории ГНИИЧТЭОС.

Таблица 1 – Основные физико-механические характеристики катионитовой составляющей гетерогенной мозаичной мембраны Поликон КА.

НФФ	Постре-лаксацион-ный период, час	Концентра-ция наночастиц Si, масс %	F_{max}, Н	σ, МПа	Е, ГПа	ε, %
без обработки в плазме	0	0	69	44	6,6	1
с обработкой в плазме	2	1,5	200	87	5,8	3,5
	24	1,5	200	87	6,0	3,5
	48	1,5	198	90	5,4	4

В данной работе основное внимание уделено исследованию физико-механических свойств канионитовой составляющей гетерогенной мозаичной мембраны Поликон КА, содержащей кремниевые «core-shell» наночастицы в зависимости от времени пострелаксационного периода, прошедшего с момента плазменной обработки волокнистой основы. В качестве модельной волокнистой основы использовалась ткань из новолачного фенол формальдегидного волокна (НФФ).

Таблица 2 – Данные дифференциально сканирующей калориметрии катионитовой составляющей гетерогенной мозаичной мембраны Поликон КА, содержащей кремниевые наночастицы.

НФФ	Пострелаксационный период, час	Концентрация наночастиц Si, масс %	$\frac{T_Н\text{-}T_К}{T_{MAX}}$, °С	ΔН, Дж/г
без обработки в плазме	0	0	$\frac{68\text{-}99}{88}$	39,47
с обработкой в плазме	2	1,5	$\frac{71\text{-}110}{92}$	89,29
	24		$\frac{69\text{-}112}{90}$	85,52
	141		$\frac{66\text{-}108}{87}$	99,26

Проведенная серия экспериментов показала, предварительная плазменная обработка волокнистой основы влияет на структуру и свойства получаемых мембран, при этом показано, что влияние оказывается и на протекание процессов синтеза и формирования ионитовой матрицы (Таблица 2).

В исследованном пострелаксационном периоде от 0 до 140 часов отмечены незначительные колебания в количественных характеристиках влияния плазменной обработки волокнистой основы это говорит о возможности хранения полученного препрега на обработанной волокнистой системе при этом расширяются технологические возможности всего процесса в целом. Дальнейшим этапом исследования стало введения наночастиц Si в объёме 1,5% от массы пропиточного состава и получение мембран на обработанной в плазме волокнистой системе, полученный комплекс промежуточных данных показал перспективность предлагаемых решений.

Выводы

В результате проведенного исследования отмечено увеличение теплового эффекта реакции отверждения по сравнению с пропитывающими составами при отсутствии

наночастиц Si, так же заметно их активное участие в процессе структурирования ионитовой матрицы с образованием более разветвленной сшитой структуры. Предварительная плазменная обработка волокнистой основы существенно влияет на улучшение физико-механических характеристик исследуемых материалов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 23-29-00346.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Membranes technology. A practical guide to membrane technology and applications in food and bioprocessing. Elseveir Ltd., 2010. 289 p.
2. Tewari P.K. Nanocomposite. Membrane. Technology. Fundamentals and applications. Boca Raton: CRC Press, 2016. 312 p.
3. Апель П.Ю., Велизаров С., Волков А.В., Елисеева Т.В., Никоненко В.В., Паршина А.В., Письменская Н.Д., Попов К.И., Ярославцев А.Б. Фаулинг и деградация мембран в мембранных процессах // Мембраны и мембранные технологии. 2022. Т. 12. № 2. С.81-106.
4. Кардаш М.М., Терин Д.В. Применение вискозных нетканых материалов в качестве волокнистой основы мозаичных мембран «Поликон»// Мембраны и мембранные технологии, 2020, Т 10, № 1, С. 73-80.
5. orbit.com
6. Syrtsova D.A., Zinoviev A.V., Piskarev M.S. et al. Effect of low-temperature plasma on the structure of surface layers and gas-separation properties of poly(vinyltrimethylsilane) membranes// Membranes and membrane technologies, 2023, Vol. 5, №2, P. 98-106.
7. Terin, D., Kardash, M., Ainetdinov, D., Turaev, T., Sinev, I. Anion-exchange membrane “Polikon A” based on polyester fiber fabric (functionalized by Low-Temperature High-Frequency plasma) with oxidized metal nanoparticles//Membranes 2023, 13, 742.
8. Терин Д.В., Кардаш М.М., Тураев Т.А., Айнетдинов Д.В. Низкотемпературная ионно-плазменная предподготовка волокнистых систем при создании композиционных гетерогенных мембран // Мембраны и мембранные технологии, 2023, Т. 13, №4, С. 291-300.

Научное издание

ЧЕТВЕРТЫЙ МЕЖДУНАРОДНЫЙ КОСЫГИНСКИЙ ФОРУМ «ПРОБЛЕМЫ ИНЖЕНЕРНЫХ НАУК: ФОРМИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СУВЕРЕНИТЕТА», ПОСВЯЩЁННЫЙ 120-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ А. Н. КОСЫГИНА

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СИМПОЗИУМ «ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОРЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТИ, ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОЦЕССОВ И АППАРАТОВ ХИМИЧЕСКОЙ И СМЕЖНЫХ ОТРАСЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ», ПОСВЯЩЕННЫЙ 120-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ П. Г. РОМАНКОВА (ISTS«EESTE-2024»)

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ
(ТОМ 1)

20–22 февраля 2022 года

Технический редактор Бородина Е. С.
Компьютерная верстка и макет Бородина Е. С.

Материалы публикуются в авторской редакции