

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»)

**ПРОГРАММА И МАТЕРИАЛЫ ПЛЕНАРНОЙ СЕССИИ**

**2024**

**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»)**

**ПРОГРАММА И МАТЕРИАЛЫ ПЛЕНАРНОЙ СЕССИИ**

**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]:** программа и материалы пленарной сессии международного научно-технического симпозиума, посвящённого 120-летию со дня рождения П. Г. Романкова (ISTS «EESTE-2024») / М.: ФГБОУ ВО «РГУ им. А. Н. Косыгина», 2024. – 136 с.

**ISBN 978-5-00181-554-9**

В сборник включены пленарные доклады российских и зарубежных ученых, в которых приводятся результаты научных исследований энергоэффективных процессов и технологических систем, рассматриваются современные пути повышения энергоэффективности и экологической безопасности процессов и аппаратов химической и смежных отраслей промышленности.

**ISBN 978-5-00181-554-9**

УДК 66.02(06)

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

© Авторы статей, 2024

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СИМПОЗИУМ  
«ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОРЕСУРСООБЪЕКТИВНОСТИ,  
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  
«ПРОБЛЕМЫ ИНЖЕНЕРНЫХ НАУК: ФОРМИРОВАНИЕ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СУВЕРЕНИТЕТА»  
20 — 22 ФЕВРАЛЯ 2024 ГОДА**

**Организаторами Форума и Симпозиума являются:**

- Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
- Министерство промышленности и торговли Российской Федерации
- 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 энергоэффективных 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: oхtraxt@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)  
Седяров 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 Ke., prof. (China)  
Kiwi-Minsker Liubov, 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)

## **РЕГЛАМЕНТ РАБОТЫ**

### **ПЕРВЫЙ ДЕНЬ ПЛЕНАРНАЯ СЕССИЯ ФОРУМА**

**Дата: 20 февраля 2024 года**

**Актальный зал РГУ имени А.Н. Косыгина  
(ул. Малая Калужская, д. 1, м. Шаболовская)**

### **ВТОРОЙ ДЕНЬ ПЛЕНАРНАЯ СЕССИЯ СИМПОЗИУМА**

**Дата: 21 февраля 2024 года**

**Время работы: 10.00 -18.00**

**Кофе пауза: 13.00-14.00**

**Онлайн зал РГУ имени А.Н. Косыгина  
Товарищеский фуршет: 18.00  
(ул. Малая Калужская, д. 1, м. Шаболовская)**

### **ТРЕТИЙ ДЕНЬ СЕКЦИОННЫЕ ДОКЛАДЫ**

**Дата: 22 февраля 2024 года**

**Время работы: 10.00 -18.00**

**Кофе пауза: 13.00-14.00**

**Аудитория 6309, Корпус № 6 РГУ имени А.Н. Косыгина  
(ул. Донская, д. 39, м. Шаболовская)**

### **ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ ДОКЛАДОВ И ВЫСТУПЛЕНИЙ**

**ПЛЕНАРНЫХ – ДО 15 МИНУТ**

**СЕКЦИОННЫХ – ДО 10 МИНУТ**

**ВЫСТУПЛЕНИЙ – ДО 5 МИНУТ**

## ПРИВЕТСТВЕННОЕ СЛОВО



**Белгородский В. С., д-р соц. наук, канд. техн. наук,  
профессор**

*Ректор Российского государственного  
университета имени А.Н. Косыгина  
(Технологии. Дизайн. Искусство)  
г. Москва, Россия*

## ПРИВЕТСТВЕННОЕ СЛОВО



**Гуляев Ю. В., д-р техн. наук, академик РАН**

*Президент Международного и Российского Союзов научных и  
инженерных общественных объединений  
г. Москва, Россия*

## ПРИВЕТСТВЕННОЕ СЛОВО

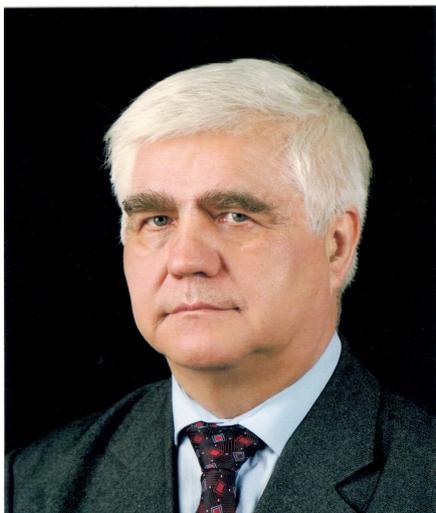


**Gong Ke, профессор**

*WFEO Immediate Past President  
World Federation of Engineering Organizations (WFEO).  
Executive Director, Chinese Institute for New Generation  
Artificial Intelligence Development Strategies  
Nanjing, China*

**Гонг Ке**

*Past Президент Всемирной федерации инженерных  
организаций (WFEO), Исполнительный директор  
Китайского института стратегий развития  
искусственного интеллекта нового поколения  
г. Нанкин, г. Пекин, Китай*

**ПРИВЕТСТВЕННОЕ СЛОВО****Друкаренко С. П., канд. техн. наук**

*Вице-президент, первый секретарь Российского Союза научных и инженерных общественных объединений (РосСНИО), первый вице-президент Международного Союза НИО  
г. Москва, Россия*

**ПЁТР ГРИГОРЬЕВИЧ РОМАНКОВ — ВЫДАЮЩИЙСЯ УЧЁНЫЙ И ЧЕЛОВЕК****Абиев Р. Ш., д-р техн. наук, профессор**

*Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)  
г. Санкт-Петербург, Россия*

**ПРИВЕТСТВЕННОЕ СЛОВО****Мясникова (Романкова) Л. П., канд. физ.-мат. наук**

*Физико-технический Институт им.А.Ф Иоффе РАН  
г. Санкт-Петербург, Россия*



**Романков Л. П., канд. техн. наук**

*Действительный государственный советник СПБ 1-го класса  
г. Санкт-Петербург, Россия*



**Романкова М. П., врач**

**1931 — 2023 гг.**

*г. Санкт-Петербург, Россия*

## **РАЗВИТИЕ НАУКИ О ПРОЦЕССАХ И АППАРАТАХ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ В «ЭПОХУ П. Г. РОМАНКОВА» И ЕЁ РОЛЬ В ПРОГРЕССЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ НАУК**



**Федосов С. В., д-р техн. наук, академик РААСН**

*Национальный исследовательский Московский  
государственный строительный университет  
г. Москва, Россия*

**НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ — НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ****Лесовик В. С., д-р. техн. наук, чл.-корр. РААСН**

*Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова  
г. Белгород, Россия*

**АКТУАЛЬНЫЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНО-ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ  
ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭНЕРГОРЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТИ  
ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРОИЗВОДСТВ И ОБРАЗОВАНИЯ ИНЖЕНЕРНО-  
ТЕХНИЧЕСКИХ СПЕЦИАЛИСТОВ (АКТОВЫЙ ЗАЛ, ОНЛАЙН ЗАЛ)****Мешалкин В. П., д-р техн. наук, академик РАН**

*Международный институт логистики  
ресурсосбережения и технологической  
инноватики (МИ-ЛРТИ), РХТУ им. Менделеева  
г. Москва, Россия*

**ИНСТРУМЕНТЫ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ  
ЭКСТРАКЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ****Вошкин А. А., д-р техн. наук, чл.-корр. РАН**

*Институт общей и неорганической химии  
им. Н. С. Курнакова РАН,  
г. Москва, Россия*

**ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ  
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ХИМИЧЕСКОЙ И СМЕЖНЫХ  
ОТРАСЛЯХ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**



**НАСТАВНИК**

**Седляров О. И., д-р техн. наук, профессор**

*Российский государственный  
университет имени А.Н. Косыгина  
(Технологии. Дизайн. Искусство)  
г. Москва, Россия*



**Отрубьянников Е. В., канд. техн. наук**

*Российский государственный  
университет имени А.Н. Косыгина  
(Технологии. Дизайн. Искусство)  
г. Москва, Россия*

**НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ СУШИЛОК,  
ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
NEW GENERATION OF GREEN TECHNOLOGY INDUSTRIAL DRYERS**

**Prof. Odilio Alves-Filho**

*NewDryTech AS,  
Trondheim, Norway*

**Одилио Алвес-Фильо, профессор**

*NewDryTech AS,  
г. Тронхейм, Норвегия*



**СИСТЕМНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА  
РАЗРАБОТКИ И ПРОИЗВОДСТВА ХИМИЧЕСКИХ РЕАКТИВОВ И  
ОСОБО ЧИСТЫХ ВЕЩЕСТВ**



**Бессарабов А. М., д-р техн. наук, профессор**

*АО Научный центр «Малотоннажная химия»,  
г. Москва, Россия*

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ ТЕКСТИЛЬНОЕ ПРОИЗВОДСТВО И  
ПРОГРЕСС В ЕГО РЕАЛИЗАЦИИ В КИТАЕ  
TEXTILE INTELLIGENT MANUFACTURING ENGINEERING AND ITS  
IMPLEMENTATION PROGRESS IN CHINA (АКТОВЫЙ ЗАЛ, ОНЛАЙН  
ЗАЛ)**



**Мэй Шуньчи, профессор**

*Уханьский текстильный университет, Правительственная  
ключевая лаборатория цифрового текстильного  
оборудования провинции Хубэй  
г. Ухань, Китай*

**Mei Shunqi**

*Wuhan Textile University, Hubei Province Government Key  
Laboratory of Digital Textile Equipment  
Wuhan, China*

**ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ СПОСОБЫ И АППАРАТЫ НА ОСНОВЕ  
ВИХРЕВЫХ ПОТОКОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ ПЫЛЕГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ  
НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ПИЩЕВОЙ И ХИМИЧЕСКОЙ  
ПРОМЫШЛЕННОСТИ**



**Акулич А. В., д-р техн. наук, профессор**

*Белорусский государственный университет пищевых и  
химических технологий,  
г. Могилев, Р. Беларусь*

## СТРАТЕГИЯ И CASE-STUDY ГЛОБАЛЬНОГО ПРОДВИЖЕНИЯ РОССИЙСКИХ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ STRATEGY AND CASE-STUDY OF RUSSIAN INNOVATIVE TECHNOLOGIES GLOBAL PROMOTION



### **Шин Кванг-Хи**

Председатель экономического форума сотрудничества между  
Кореей и Россией (World OKTA)

Почетный президент московского отделения World OKTA  
SBER A Advisor of G.Director, KOSME Moscow GBC Advisor  
Республика Корея, Россия

### **Shin Kvang Khi**

Chairman of the Economic Forum for Cooperation between Korea  
and Russia (World OKTA)

Honorary President of the Moscow branch World OKTA  
SBER A Advisor of G.Director, KOSME Moscow GBC Advisor  
Republic of Korea, Russia

## НОВЫЕ ПОДХОДЫ К ЭНЕРГО- И РЕСУРСОЭФФЕКТИВНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ ТОПЛИВНЫХ СИСТЕМ



### **Дьячкова С. Г., д-р хим. наук, профессор**

*Иркутский национальный исследовательский технический  
университет,  
г. Иркутск, Россия*

## ЭКСТРАГИРОВАНИЕ ЦЕЛЕВЫХ КОМПОНЕНТОВ ИЗ ТВЕРДОЙ ФАЗЫ



### **Рудобашта С. П., д-р техн. наук, профессор**

*Российский государственный аграрный университет — МСХА  
имени К. А. Тимирязева  
г. Москва, Россия*

## МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ РАБОТЫ УТИЛИЗАТОРОВ ТЕПЛА НИЗКОГО ПОТЕНЦИАЛА



**НАСТАВНИК**

**Гаряев А. Б., д-р техн. наук, профессор**

*Национальный исследовательский университет «МЭИ»,  
г. Москва, Россия*



**Прун О. Е., канд. техн. наук**

*Национальный исследовательский университет «МЭИ»,  
г. Москва, Россия*

## ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ В МИКРО-И МАКРОМАСШТАБНЫХ РЕАКТОРАХ ДЛЯ КОНТРОЛИРУЕМОГО СИНТЕЗА ОРГАНИЧЕСКИХ И НЕОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ



**Абиев Р. Ш., д-р техн. наук, профессор**

*Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)  
г. Санкт-Петербург, Россия*

## КАПСУЛИРОВАНИЕ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПСЕВДООЖИЖЕННОМ СЛОЕ



**НАСТАВНИК**

**Липин А. Г., д-р техн. наук, профессор**

*Ивановский государственный химико-технологический университет  
г. Иваново, Россия*



**Липин А.А., канд. техн. наук**

*Ивановский государственный химико-технологический университет  
г. Иваново, Россия*

## ИННОВАЦИОННЫЕ ЭНЕРГОРЕСУРСΟΣБЕРЕГАЮЩИЕ ПРОЦЕССЫ УТИЛИЗАЦИИ МЕТАЛЛСОДЕРЖАЩИХ ГАЛЬВАНОШЛАМОВ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ПРОМЫШЛЕННОЙ ПРОДУКЦИИ



**Ольшанская Л. Н., д-р хим. наук, профессор**

*Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.  
г. Саратов Россия*

## СОПРЯЖЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ



### НАСТАВНИК

**Равичев Л. В., д-р техн. наук, профессор**

*Российский химико-технологический университет имени  
Д. И. Менделеева  
г. Москва, Россия*



**Ильина С. И., канд. техн. наук**

*Российский химико-технологический университет имени  
Д. И. Менделеева  
г. Москва, Россия*

## ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ



**Таранцева К. Р., д-р техн. наук, профессор**

*Пензенский государственный технологический университет  
г. Пенза, Россия*

**Молодежный  
конкурс «Цифровые  
решения в  
инженерных  
задачах»**

### ИТОГИ, НАГРАЖДЕНИЕ ПОБЕДИТЕЛЕЙ

*Дипломы победителям и благодарственные письма участникам конкурса. Компания АСКОН, крупнейший российский разработчик инженерного программного обеспечения, и промышленные партнеры предоставляют призы победителям и призёрам конкурса*

**МАТЕРИАЛЫ ПЛЕНАРНОЙ СЕССИИ МЕЖДУНАРОДНОГО НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО СИМПОЗИУМА «ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОРЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТИ, ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОЦЕССОВ И АППАРАТОВ ХИМИЧЕСКОЙ И СМЕЖНЫХ ОТРАСЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ», ПОСВЯЩЕННОГО 120-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ П. Г. РОМАНКОВА (ISTS«EESTE-2024»)**

**В. Ф. ФРОЛОВ, О. М. ФЛИСЮК**

ПАМЯТИ ПЕТРА ГРИГОРЬЕВИЧА РОМАНКОВА ..... 20

**С. В. ФЕДОСОВ**

РАЗВИТИЕ НАУКИ О ПРОЦЕССАХ И АППАРАТАХ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ В «ЭПОХУ П. Г. РОМАНКОВА» И ЕЁ РОЛЬ В ПРОГРЕССЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ НАУК..... 27

**В. П. МЕШАЛКИН**

АКТУАЛЬНЫЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНО-ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭНЕРГОРЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРОИЗВОДСТВ И ОБРАЗОВАНИЯ ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СПЕЦИАЛИСТОВ ..... 36

**А. А. ВОШКИН**

ИНСТРУМЕНТЫ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ ЭКСТРАКЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ..... 48

**А. М. БЕССАРАБОВ**

СИСТЕМНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА РАЗРАБОТКИ И ПРОИЗВОДСТВА ХИМИЧЕСКИХ РЕАКТИВОВ И ОСОБО ЧИСТЫХ ВЕЩЕСТВ ..... 50

**А. В. АКУЛИЧ**

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ СПОСОБЫ И АППАРАТЫ НА ОСНОВЕ ВИХРЕВЫХ ПОТОКОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ ПЫЛЕГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ПИЩЕВОЙ И ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ ..... 62

**ШИН КВАНГ-ХИ**

СТРАТЕГИЯ И КЕЙС-СТАДИ ГЛОБАЛЬНОГО ПРОДВИЖЕНИЯ РОССИЙСКИХ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ..... 74

**Р. Ш. АБИЕВ**

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ В МИКРО-И МАКРОМАСШТАБНЫХ РЕАКТОРАХ ДЛЯ КОНТРОЛИРУЕМОГО СИНТЕЗА ОРГАНИЧЕСКИХ И НЕОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ ..... 76

**С. П. РУДОБАШТА**

ЭКСТРАГИРОВАНИЕ ЦЕЛЕВЫХ КОМПОНЕНТОВ ИЗ ТВЕРДОЙ ФАЗЫ ..... 89

**Л. Н. ОЛЬШАНСКАЯ**

ИННОВАЦИОННЫЕ ЭНЕРГОРЕСУРСΟΣБЕРЕГАЮЩИЕ ПРОЦЕССЫ УТИЛИЗАЦИИ МЕТАЛЛСОДЕРЖАЩИХ ГАЛЬВАНОШЛАМОВ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ПРОМЫШЛЕННОЙ ПРОДУКЦИИ..... 97

**С. Г. ДЬЯЧКОВА**

НОВЫЕ ПОДХОДЫ К ЭНЕРГО- И РЕСУРСОЭФФЕКТИВНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ ТОПЛИВНЫХ СИСТЕМ..... 105

**А. Б. ГАРЯЕВ, О. Е. ПРУН**

МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ РАБОТЫ УТИЛИЗАТОРОВ ТЕПЛА НИЗКОГО ПОТЕНЦИАЛА ..... 109

**А. Г. ЛИПИН, А. А. ЛИПИН**

КАПСУЛИРОВАНИЕ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПСЕВДООЖИЖЕННОМ СЛОЕ ..... 114

**О. И. СЕДЛЯРОВ, Е. В. ОТРУБЯННИКОВ**

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ  
ТЕХНОЛОГИЙ В ХИМИЧЕСКОЙ И СМЕЖНЫХ ОТРАСЛЯХ ПРОМЫШЛЕННОСТИ .. 123

**Л. В. РАВИЧЕВ, С. И. ИЛЬИНА**

СОПРЯЖЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ..... 132

**МАТЕРИАЛЫ ПЛЕНАРНОЙ СЕССИИ  
МЕЖДУНАРОДНОГО НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО СИМПОЗИУМА  
«ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОРЕСУРСООБЪЕКТИВНОСТИ, ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ И  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОЦЕССОВ И АППАРАТОВ  
ХИМИЧЕСКОЙ И СМЕЖНЫХ ОТРАСЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ»,  
ПОСВЯЩЕННОГО 120-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ П. Г. РОМАНКОВА  
(ISTS«EESTE-2024»)**

УДК 66.0(075.8)

DOI: 10.37816/eeste-2024-p-20-26

**ПАМЯТИ ПЕТРА ГРИГОРЬЕВИЧА РОМАНКОВА  
IN MEMORY OF PETER GRIGORIEVICH ROMANKOV  
(4 (17).01.1904 – 1.11.1990)**

**Владимир Фёдорович Фролов, Олег Михайлович Флисюк  
Vladimir F. Frolov, Oleg M. Flisyuk**

*Санкт-Петербургский технологический институт (технический университет),  
Россия, Санкт-Петербург,  
Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University), Russia, Saint Petersburg  
(e-mail: prapp@LTI-GTI.RU)*

*Аннотация:* Рассмотрен творческий научный и учебно-организационный путь чл.-корреспондента РАН, доктора технических наук, профессора П.Г. Романкова, показана его выдающаяся роль в развитии науки о процессах и аппаратах химической технологии в России, в обучении студентов в этой области, отмечены его высокопрофессиональные научные монографии, написанные им совместно с учениками, докторами технических наук, обобщающие результаты многолетних исследований его научной школы, показано исключительно большое значение для учебного процесса и практической работы инженеров задачника по процессам и аппаратам химической технологии, который переведен на многие языки и является настольной книгой специалистов как в нашей стране, так и за рубежом. Подчеркнуты высокие моральные качества юбиляра, его доброта, доброжелательность, внимательное отношение к людям вообще и подчиненным, в частности.

*Abstract:* The creative scientific, educational and organizational way of the corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Engineering, Professor P. G. Romankov has been considered. His outstanding role in the development of science of the Processes and Devices of Chemical Technology in Russia, in training the students in this area is shown. Highly professional scientific monographs written by him together with his scholars, Doctors of Engineering generalizing the results of long-term research of his scientific school are represented. Exclusively great value for educational process and practical engineering work of the book on the problems of processes and devices of chemical technology which have been translated into many languages is shown. It is the reference book for the experts in our country, and abroad. High moral qualities of the jubilar, his kindness, goodwill, the kind attitude towards the people and the subordinates as well are emphasized.

*Ключевые слова:* П.Г. Романков, научный и учебно-организационный путь, научные монографии, обучение студентов, процессы и аппараты, химическая технология.

*Keywords:* P.G. Romankov, scientific and educational - organizational path, scientific monographs, student's training, processes and apparatus, chemical technology.

Нам хотелось бы выразить искреннюю благодарность Оргкомитету Международной научно-технической конференции «Проблемы ресурсо- и энергосберегающих технологий в промышленности и АПК – ПРЭТ-2014» за добрую память о нашем Учителе – Петре Григорьевиче Романкове. Эти слова мы говорим не только от себя, но и от сотрудников

ленинградской (теперь Санкт-Петербургской) техноложки и от всей «процессной» общественности города, которых мы здесь имеем честь представлять. Просили нас передать слова благодарности об их отце и трое замечательных детей Петра Григорьевича, с которыми мы поддерживаем регулярные контакты.

Для нас, ленинградцев, Петр Григорьевич был и остается представителем славной когорты отцов-основателей нашей дисциплины «Процессы и аппараты химической технологии»: А.Г. Касаткина, Н.М. Жаворонкова, А.Н. Плановского, Н.И. Гельперина, В.В. Кафарова, А.М. Кутепова и других. Он был и остается как бы питерским филиалом этой когорты и представителем нашего города в Москве, которую он очень часто посещал и где у него было множество коллег-друзей в московских учебных институтах, в обоих Минвузах, в Химпроме и Академии Наук СССР.

Основной чертой характера Петра Григорьевича, что и привлекало к нему огромное количество самых разнообразных людей, была доброжелательность. Он всегда был готов помочь делом или добрым советом и люди очень чувствовали его доброту и платили ему тем же. Потому громадное количество самых разных людей сохраняют о Петре Григорьевиче самые добрые воспоминания. Это относится даже к тем, кто имел лишь незначительные контакты с ним тогда, как для нас, кто имел счастье долго работать с ним, прежде всего доброжелательность Петра Григорьевича останется в наших сердцах.



**Рисунок 1** — П. Г. Романков в 90-е годы.

П.Г. Романков родился в 17.01 1904 года и в 1929 году окончил Ленинградский химико-технологический институт, после чего работал на московском Дорогомиловском химзаводе и параллельно преподавал в МВТУ, МИХМе и МХТИ в 1929-1934 годах; с 1934 года и до своей кончины в 1990 году непрерывно работал в ЛТИ им. Ленсовета (с 1991 года СПбГТИ(ТУ)). В 1941 году Петр Григорьевич становится заведующим кафедрой процессов и аппаратов, сменив в этой должности К.Ф. Павлова; в 1947 защищает докторскую диссертацию и в следующем году получает звание профессора. С 1950 года Петр Григорьевич становится проректором ЛТИ; эту свою нагрузку П.Г. (как мы все его называли с его согласия) «тянул» до 1979 года, то есть почти 30 лет. Кстати, это могут оценить в полной мере только люди старшего поколения, имея в виду, что всю свою жизнь П.Г. был беспартийным, да еще имел сына-правозащитника с сомнительными знакомствами (поэт-иммигрант Иосиф Бродский, беглый

танцор кировского театра оперы и балета Рудольф Нуриев, причем последний общался не только с детьми, но и со всей семьей Романковых).



**Рисунок 2** — П. Г. Романков в 40-е годы.

Долгие годы на Петре Григорьевиче держалась вся иностранная работа института, который в те времена посещало множество известных в нашей области знания людей. Так, на нашей кафедре бывали и выступали профессор П.В. Данквертс (вспомним известные граничные условия Данквертса в процессах каталитического крекинга в химических реакторах с неподвижным и псевдооживленным слоями дисперсных катализаторов), Януш Циборовский – польский академик (известна его переведенная на русский язык еще в 1957 году книга о процессах и аппаратах, редактором перевода которой, кстати, был П.Г. Романков и когда, кроме учебника А.Г. Касаткина, подобной литературы в нашей стране еще не было), профессор И. Девидсон (оригинальная по тем временам монография о двухфазном псевдооживленном слое применительно к процессам каталитических химических реакций), японские профессора Риозо Тойе и Мацушина – видные специалисты по химико-технологическим процессам и многие другие. Многие из них проезжали к нам, как они тогда говорили, «в Ленинград, к Романкову».

На научном форуме главным представляется сказать о наиболее интересных научных результатах многогранной деятельности П.Г. Романкова. Кафедра процессов и аппаратов ЛТИ им. Ленсовета в советские годы была довольно многочисленной: до 75 штатных единиц, из которых 25 преподавателей; остальные – это научные сотрудники, инженеры по госбюджетной и хоздоговорной науке, как в те времена говорилось; в том числе 8 докторов наук (1988 год). Исследования велись довольно широким фронтом. Изучались процессы сушки дисперсных и пастообразных материалов (последнее было, как теперь говорят, «фишкой» кафедры) с Н.Б. Рашковской, потом с В.Ф. Фроловым (всю свою жизнь сушкой занимался в Тамбове и бывший аспирант Петра Григорьевича, профессор В.И. Коновалов); адсорбционные процессы с В.Н. Лепилиным и с И.О. Протодьяконовым; сепарацией суспензий и эмульсий с С.А. Плюшкиным; перемешиванием в жидких средах с И.С. Павлушенко; ректификацией с А.А. Носковым и Э.К. Сийрде; позднее – ионообменными процессами с Н.Н. Смирновым; гранулированием во взвешенном слое – с О.М. Флисюком.

Исследования проводились широким фронтом: разрабатывались теоретические, физико-математические модели процессов, проектировались и создавались экспериментальные и пилотные установки, проводились многочисленные эксперименты;

создавались инженерные методы расчетов изучаемых процессов; разрабатывались рекомендации для проектирования, строительства и эксплуатации промышленных установок; многое внедрялось в промышленную практику. По многочисленным результатам, полученным под руководством Петра Григорьевича, было подготовлено более 25 докторов наук (в те времена это было событием и для человека и для института да и для научного сообщества в данной области). В последующие годы эти доктора наук сами готовили докторов и кандидатов. В те далекие времена на все хватало и людей и средств и энтузиазма. Главное, было понимание того, что для развития страны необходимы научные исследования и инженерно-научные кадры.

По результатам научных исследований писались и издавались монографии. Самая первая монография Романкова была написана еще в 1948 году и посвящена гидромеханическим процессам, как и его докторская диссертация, а первая научная публикация по вопросу сушки твердых материалов (написанная, кстати, совместно с супругой Петра Григорьевича - Давиденковой Людмилой Николаевной) появилась еще в далекие предвоенные годы в 1934 году. Начиная с 60-х годов монографии, появлялись регулярно. Первой из этой серии научных публикаций была книга, написанная совместно с Н.Б. Рашковской и посвященная вопросам сушки влажных материалов в кипящем слое. В эту монографию вошли, в основном, собственные исследования по непрерывному обезвоживанию многочисленных пастообразных материалов, как на слое собственных подсушенных гранул, так и на взвешенных частицах инертного материала (полых и сплошных стальных шаров и фторопластовой крошки различных, специально подбираемых размеров) с выгрузкой сухого материала из самого псевдооживленного слоя или с потоком сушильного агента через циклон. Была подробно представлена предложенная авторами конструкция вибрационного питателя, с помощью которого исходный пастообразный материал подавался в сушильный аппарат в необходимых количествах. Книга оказалась весьма востребованной и в последующие годы вышли из печати еще несколько изданий с существенными дополнениями, полученными по результатам последующих, непрерывно проводимых на кафедре исследований, где в те времена работали аспиранты - будущие доктора наук Э.О. Регер, В.Е. Куцакова и другие сотрудники большого коллектива энтузиастов.

По результатам предложенного кафедрой и изготовленного на одном из уральских заводов тарельчатого, сепаратора с пульсирующей выгрузкой сгущенной суспензии также была издана монография, обобщающая не только собственные, но и имеющиеся литературные данные по теории и практике работы по разделению неоднородных систем в поле центробежных сил. Исследования процессов адсорбции газов и паров различными адсорбентами также оформились в виде монографии и докторской диссертации по этой теме.

В последующие годы издавались и переиздавались научные монографии Петра Григорьевича, написанные им совместно с иными сотрудниками кафедры процессов и аппаратов. Это и монографии по процессам экстрагирования из твердых материалов, по массообменным и теплообменным процессам химической технологии, по гидромеханическим процессам.

Значительное количество монографий издавалось учениками П.Г. Романкова: И.О. Протодьяконовым, Н.Н. Смирновым, В.Ф. Фроловым, И.Н. Тагановым, В.Д. Лукиным, О.М. Флисюком и другими. Так что научно-литературный «след», оставленный школой нашего Учителя, весьма широк по тематике исследований и по протяженности во времени. Научно-литературная деятельность П.Г. Романкова не ограничивалась только написанием собственных монографий. В 60-е годы он – научный редактор переводов многих весьма солидных научных трудов зарубежных авторов: «Теплопередача и теплообменники» (1961 г.) и «Массопередача и абсорбция» (1964 г.) Т. Хоблера, «Основы процессов химической технологии» (1967 г.) Я. Циборовского. Совместно с академиком Н.М. Жаворонковым он - редактор перевода на русский язык фундаментального справочника инженера-химика Дж. Пери (1969 г.). В последней работе существенную помощь Петру Григорьевичу оказывал А.А. Медведев.

Значительную работу выполнял П.Г. Романков в качестве редактора периодических научных изданий (журналов). Так, в 1963 году совместными усилиями П.Г. и Н.М. Жаворонкова был основан академический журнал «Теоретические основы химической технологии», заместителем главного редактора которого Романков был более двадцати лет. Более пятнадцати лет Петр Григорьевич работал главным редактором другого академического «Журнала прикладной химии», базирующегося в Ленинграде (Санкт-Петербурге). Доводилось Петру Григорьевичу выполнять и разовые научно-организационные мероприятия: в шестидесятые и семидесятые годы он организовывал и был председателем организационных комитетов всесоюзных научно-технических конференций по экстракции и по адсорбции, проходивших в ЛТИ им. Ленсовета.

Общее количество собственных научных публикаций Петра Григорьевича насчитывает более 400 позиций, включая порядка 50-ти авторских свидетельств и патентов, за которыми, впрочем, в силу своей врожденной скромности он никогда не гнался. Работал в качестве члена большого количества разнообразных Советов Минхимпрома, АН СССР, ВАК СССР; в редакционном Совете журнала «Известия вузов. Химия и химическая технология».

За плодотворную научную и научно-организационную работу Романков был избран членом- корреспондентом АН СССР по отделению неорганической химии (1964 г.). Были и другие формы признания: заслуженный деятель науки и техники РСФСР, правительственные награды, в том числе ордена Ленина и Октябрьской Революции, звания почетного доктора наук высших учебных заведений Венгрии, Германии, Польши, Чехословакии и Югославии.

Несмотря на внушительные научные результаты и на долголетнее членство Петра Григорьевича в Академии Наук, все же самым важным в его обширной деятельности была работа по подготовке инженерных кадров, то есть работа учебная. И здесь нам представляется самым существенным, что сделано Петром Григорьевичем, – это, во-первых, создание лабораторного практикума по классическому курсу процессов и аппаратов химической технологии и, во-вторых, - написание знаменитого задачника для практических занятий по курсу.

Лабораторный практикум создавался в первые послевоенные годы и в нем были реализованы около двадцати работ по основным разделам курса: гидравлике, гидромеханическим методам разделения неоднородных систем, теплопередаче, выпариванию, абсорбции, экстракции, ректификации, сушке и умеренному охлаждению.

Отличительных особенностей лабораторных работ, созданных на кафедре процессов и аппаратов в ЛТИ, было две: во-первых, основные технологические процессы были представлены работающими установками непрерывного действия, что приближало их к условиям работы такого рода установок в промышленности. Второе – это масштаб лабораторных установок. Учебных помещений в те времена было достаточно; рабочих рук и мощностей производственных мастерских института – тоже.

Издательством Химия было издано (и несколько раз переиздавалось) написанное сотрудниками кафедры «Руководство для практических занятий в лаборатории процессов и аппаратов». В этом «Руководстве» приводились технические детали учебных установок для использования их при воспроизводстве аналогичных лабораторных работ в иных институтах страны. Когда-то созданная Романковым учебная лаборатория считалась образцовой.

Второе несомненное достижение Петра Григорьевича в учебной работе – это создание широко используемого при подготовке инженеров-технологов (и не только технологов-химиков) учебного пособия «Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии», написанного совместно с К.Ф. Павловым и А.А. Носковым, первое издание которого вышло еще в 50-е годы. Этот задачник оказался весьма удачным пособием не только для практических занятий студентов по каноническому курсу процессов и аппаратов, но используется также при выполнении учащимися курсовых проектов по различным темам курса. Более того, задачником пользуются и инженеры-проектировщики и инженеры-технологи в своей практической работе. Насколько нам известно, такого объемного пособия, содержащего в том числе и многочисленные решенные примеры на самые разнообразные

темы классического курса процессов и аппаратов, в учебной литературе не было. Недаром «Примеры и задачи» еще при жизни Петра Григорьевича переиздавались издательством ХИМИЯ десять раз через каждые три-четыре года, несмотря на прежние тиражи в десятки тысяч экземпляров. Даже после 1990 года, когда Петра Григорьевича уже не стало с нами, одно из современных коммерческих издательств выпустило два или три стереотипных тиража все того же задачника. Более того, по инициативе и предложению самого Петра Григорьевича переработанный задачник с несколько измененным названием («Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи)») и составом авторов переиздавался три раза (последнее издание ХИМИЗДАТА было в 2010 году). Задачник по процессам и аппаратам получил и международное признание, свидетельством чему являются известные нам его переводы на одиннадцать языков.

Петр Григорьевич, пока он был с нами, постоянно и всемерно поощрял своих сотрудников к самостоятельному написанию и изданию научных монографий и учебников и многочисленных методических пособий, что привело к появлению научной и учебной литературы его многочисленных учеников. Таким образом, в течение десятков лет складывалась научная и учебно-методическая школа П.Г. Романкова.

Светлая память о нашем П.Г. имеет для нас своей основой не только и даже не столько то, что он был большим ученым и педагогом, но, прежде всего, – его безграничную доброжелательность к людям вообще и особенно к тем, с кем он часто общался по работе. Никто из нас не может вспомнить, чтобы кто-то отозвался о П.Г. без теплых слов, хотя будучи в течение тридцати лет проректором немалого института, ему невольно приходилось кому-то и «наступать на хвост». Но даже это он умел делать так, что люди на него не обижались.

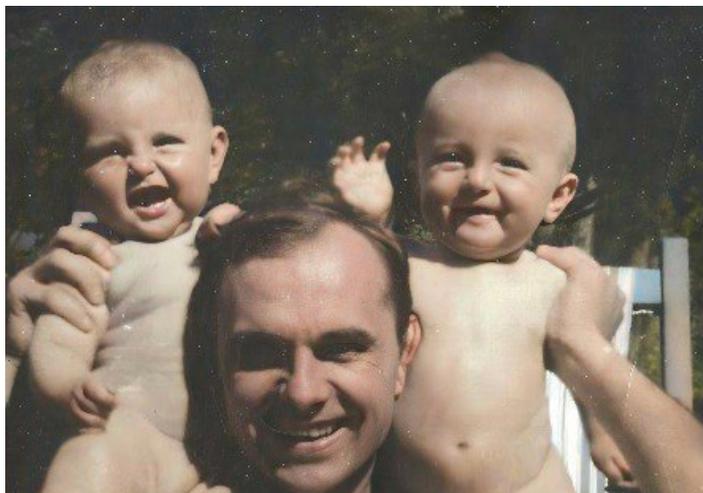
В его собственной жизни далеко не все Петру Григорьевичу давалось легко. Так в блокадные годы, когда институт еще летом 1942 года был эвакуирован в Казань, двести сотрудников (из них всего девятнадцать мужчин) и П.Г. вместе с ними были оставлены в Ленинграде для проведения необходимых и, как всегда на войне, срочных работ. Вместе с Петром Григорьевичем в квартире с дровяным отоплением (тогда это было очень важно) остались жена и трое детей 10-ти и 4-х лет. Кстати, из малолетних тогда детишек выросли очень дружные между собой, замечательные люди: старшая дочь до сих пор работает врачом-хирургом; сын, инженер-радиоэлектроник, дважды выбирался депутатом Законодательного собрания Петербурга, где руководил комитетом по культуре; вторая дочь, инженер-физик работает в физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе, которым до последнего времени руководил единственный в нашей стране нобелевский лауреат Ж.И. Алферов.



Рисунок 3 — П. Г. Романков с супругой и детьми.

Каждый день в любую погоду Петру Григорьевичу приходилось пешком ходить по заснеженному городу на работу в институт (это порядка пяти километров в один конец). Необходимо было заниматься тем, в чем нуждался фронт и тыл. Так были разработаны рекомендации по производству водорода для аэростатов воздушного загрязнения города.

Совместно с Л.Н. Давиденковой была предложена новая технология получения газовых смесей для калибровки корабельных и самолетных газоанализаторов; в фармацевтической мастерской института было организовано производство амидохлорной ртути для борьбы с сыпным тифом и других препаратов для госпиталей города. Однако, наибольшая заслуга Петра Григорьевича и его сотрудников в этот голодный блокадный период была разработка экстракционной технологии получения соевого молока и шрота из соевых бобов); все это сразу же уходило в госпитали и детские больницы осажденного города.



**Рисунок 4** — П. Г. Романков с младшими детьми.

Светлая память о нашем П.Г. будет жить в наших сердцах, пока живы те, кому выпало счастье работать с нашим Другом и Учителем. И пусть знают о том, какой это был замечательный Человек те молодые люди, которые будут учиться по его многочисленным книгам. И будем надеяться, что наступят в нашей стране времена, когда инженерные и научные кадры будут снова востребованы в полной мере, как это было в долгий период научно-педагогической деятельности Петра Григорьевича Романкова.



**Рисунок 5** — П.Г. Романков в 40-е годы.

УДК 66.02

DOI: 10.37816/eeste-2024-p-27-35

**РАЗВИТИЕ НАУКИ О ПРОЦЕССАХ И АППАРАТАХ  
ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ В «ЭПОХУ П. Г. РОМАНКОВА» И ЕЁ РОЛЬ В  
ПРОГРЕССЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ НАУК  
DEVELOPMENT OF THE SCIENCE ABOUT PROCESSES AND APPARATUS OF  
CHEMICAL TECHNOLOGY IN THE “AGE OF P.G. ROMANKOV” AND ITS ROLE IN  
THE PROGRESS OF BUILDING SCIENCES**

**Сергей Викторович Федосов  
Sergej V. Fedosov**

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный  
университет – НИУ МГСУ, Россия, Москва  
Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) – MGSU,  
Russia, Moscow  
(e-mail: fedosov-academic53@mail.ru)*

*Аннотация:* Настоящая статья посвящена юбилею замечательного учёного и организатора науки «Процессы и аппараты химической технологии», **члена-корреспондента Академии Наук СССР**, заведующего кафедрой «Процессы и аппараты химической технологии» (с 1941-го по 1986-й год) Ленинградского технологического института им. Ленсовета, доктора технических наук, профессора **Петра Григорьевича Романкова**. Крупный учёный, специалист в области теории и практики гидродинамических, тепловых и массообменных процессов, создатель авторитетной научной школы (подготовил более 150-ти учеников - докторов и кандидатов технических наук); автор ряда монографий и учебных пособий; создатель популярнейшего пособия «**Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии**». Данное пособие выдержало (пока) 13 изданий, из них - 10 прижизненных (1947 - первое, 1987 - десятое). Сотни тысяч советских, российских и зарубежных специалистов в области химической технологии, получивших высшее образование и плодотворно трудившихся на предприятиях народного хозяйства своих государств, «оттачивали» свои профессиональные знания и навыки именно на практических и лабораторных занятиях по предмету процессов и аппаратов.

*Abstract:* This article is dedicated to the anniversary of the remarkable scientist and organizer of the science “Processes and apparatus of chemical technology”, **corresponding member of the USSR Academy of Sciences**, head of the department of “Processes and apparatus of chemical technology” (from 1941 to 1986) of the Leningrad Technological Institute. Lensovet, Doctor of Technical Sciences, Professor **Pyotr Grigorievich Romankov**. A prominent scientist, an expert in the field of theory and practice of hydrodynamic, thermal and mass transfer processes, the creator of an authoritative scientific school (trained more than 150 students - doctors and candidates of technical sciences); author of a number of monographs and textbooks; creator of the most popular textbook “**Examples and problems for the course of processes and apparatus of chemical technology.**” This manual has gone through (so far) 13 editions, of which 10 were lifetime editions (1947 - the first, 1987 - the tenth). Hundreds of thousands of Soviet, Russian and foreign specialists in the field of chemical technology, who received higher education and worked fruitfully at the enterprises of the national economy of their states, “honed” their professional knowledge and skills precisely in practical and laboratory classes on the subject of processes and apparatus.

*Ключевые слова:* химические технологии, процессы и аппараты.

*Keywords:* chemical technologies, processes and apparatus.

Как только человек в своём развитии превратился именно в Человека, он стал решать проблемы защиты себя и своего семейства от непогоды и хищников. И на протяжении многих

веков единственной его наукой был опыт. И до сих пор актуальна поговорка: «История строительной науки написана кровью!».



**Рисунок 1** — Профессор  
А. К. Крупский  
(1845-1911г.).

Много позднее, всего лишь несколько веков назад, человечество узнало науку химия. И, хотя она была «внучкой-малышкой» по сравнению с «дедом» строительства, пренебрежение к её законам оборачивалось гораздо более катастрофическими последствиями. Поэтому, и интерес к этой науке возник естественный и серьёзный. И так же естественно он распространился на направления химической технологии и развития аппаратурного оформления для их осуществления и промышленной реализации.

Впервые курс процессов и аппаратов был введён в конце 19-го столетия в Санкт-Петербургском технологическом институте профессором Крупским А.К.

В 1909-м году вышла его книга «Начальные главы учения о проектировании по химической технологии». В США аналогичный труд Уокера, Льюиса и Мак-Адамса вышел в 1923-м году. На русский язык этот труд был переведён лишь через 10 лет под названием: «Типовая химическая аппаратура, технологические характеристики, аппаратурные нормы, методы расчёта химических процессов и машин».

Перевод издания осуществлён под руководством проф. Павлова К.Ф., зав. кафедрой «Процессы и аппараты химической технологии» Ленинградского технологического института им. Ленсовета, которую он создал и возглавил в 1936-м году.

Однако, ещё раньше идея об общности ряда основных процессов и аппаратов для их осуществления в различных промышленных производствах была высказана профессором Денисовым Ф.А. в 1828-м году.

Именно в этом году он издал учебник «Пространное руководство к общей технологии, или всех работ, средств, орудий и машин, употребляемых в разных технических искусствах». К сожалению, он ушёл из жизни в 45 лет от холеры, и его фотографии не сохранилось.

Ещё один человек, внёсший огромный вклад в развитие науки о процессах и аппаратах, профессор Московского химико-технологического института Касаткин Андрей Георгиевич (1903-1963). Он был Лауреатом Сталинской премии. Его учебник «Основные процессы и аппараты химической технологии». Первое издание вышло в 1935-м, последнее, 9-е, в 1973-м, через 10 лет после смерти.



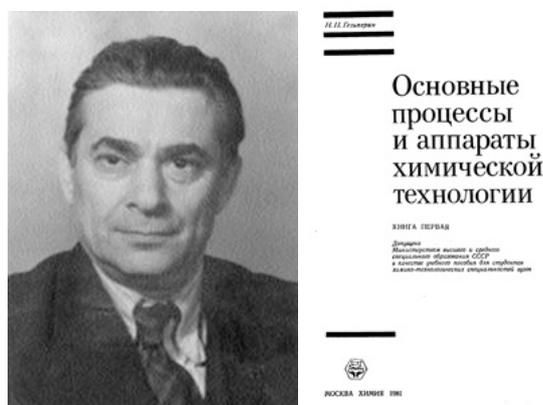
**Рисунок 2** — Обложка издания  
«Типовая химическая аппаратура,  
технологические характеристики,  
аппатурные нормы, методы  
расчёта. химических процессов и  
машин».

А.Г. Касаткин



**Рисунок 3** — Обложка издания «Основные процессы и аппараты химической технологии».

Ещё один известный учёный — проф. Гельперин Нисон Ильич (1903-1993), многолетний заведующий кафедрой процессов и аппаратов химической технологии Московского института тонкой химической технологии. В 1981-м году вышел его учебник в 2-х томах с аналогичным названием.



**Рисунок 4** — Обложка издания «Основные процессы и аппараты химической технологии».

Необходимо отметить, что курс процессов и аппаратов изначально предполагал не только изучение теоретических основ дисциплины в лекционных аудиториях, но и проведение практических занятий, и освоение лабораторного практикума.

Незаменимую помощь студентам в этом плане оказывало учебное пособие «Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии», авторы: Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Первое издание этого задачника произошло в 1947 году. После 4-го издания в 1959м году ушёл из жизни Павлов К.Ф. После 7-го издания 1970 года, ушёл из жизни А.А. Носков. Подробная хронология обновления пособия приводится в таблице 1.

**Таблица 1** – Хронология обновления учебного пособия «Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии».

№	Нумерация издания	Дата выхода, год
1	Издание №1	1947
2	Издание №2	1950
3	Издание №3	1955
4	Издание №4	1959
5	Издание №5	1961
6	Издание №6	1964
7	Издание №7	1970
8	Издание №8	1976
9	Издание №9	1981
10	Издание №10	1987
11	Издание №11	2004
12	Издание №12	2005
13	Издание №13	2006

На рисунке 5 приводится изображение современной обложки пособия «Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии» и вместе с ней обложка 2го издания 1950 года.



**Рисунок 5** — Обложка издания «Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии».



**Рисунок 6** — Романков Пётр Григорьевич (1904 – 1990).

Однако, в таком же составе авторов пособие выдержало ещё три издания, и было переведено практически на все мировые языки.

Необходимо отметить, что поскольку практически все строительные технологии осуществляются при различных температурных воздействиях, учёные в области строительных наук своевременно обратили внимание на необходимость проведения исследований и разработки учебных пособий по проблемам технической термодинамики и теплотехники. И первыми в этом направлении были работы академика АН БССР Лыкова А.В. «Теоретические основы строительной теплофизики» [21] 1961, профессора Фокина К.Ф. «Строительная теплотехника ограждающих частей зданий» [22], 1973 и академика РААСН Богословского В.Н. «Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха)» [23], 1970, 1982.

Наконец, подошло «долгожданное» время, когда научное сообщество в области строительных наук подошло к мысли о нужности и важности курса «Процессы и аппараты в производстве строительных материалов и изделий» [5, 6, 8].

В 1986 в издательстве «Высшая школа» выходит учебное пособие, автор Ерёмин Н.Ф. «Процессы и аппараты в технологии строительных материалов» [7]. Структура учебника была выстроена по образцу «классических» пособий по химической технологии, но с учётом специфики строительного направления. Основное внимание уделялось механическим, гидравлическим и, в меньшей мере, теплообменным процессам.

В 1981-м году в издательстве «Вища школа» выходит учебник авторов: Борщ И.Н., Вознесенский В.А., Мухин В.З. с аналогичным названием [8].

Учёные строители-материаловеды воспринимают идеи, заложенные в данном курсе, и с одобрения учебно-методического объединения министерства он внедряется в учебный процесс ряда ВУЗов СССР.

Следующим этапом явилось издание учебного пособия, изданного профессором Воронежского ГАСУ Шмитько Е.И. «Процессы и аппараты технологии строительных материалов и изделий», СПб, «Проспект Науки», 2018, 736 с. [14].

Это пособие с интересом воспринимается представителями научно-образовательного строительного сообщества. Вскоре, по аналогии с этим изданием выходит в свет издание авторов Грозненского государственного нефтяного университета: М.Ш.Саламанова, М.С.Сайдумов, С.А.Алиев [12].



**Рисунок 7** — Обложка издания «Процессы и аппараты в технологии строительных материалов».

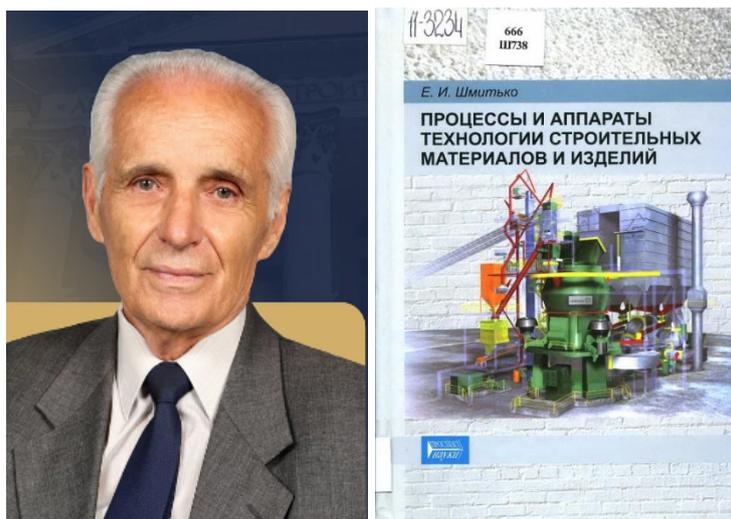


Рисунок 8 — Обложка издания «Процессы и аппараты технологии строительных материалов и изделий».

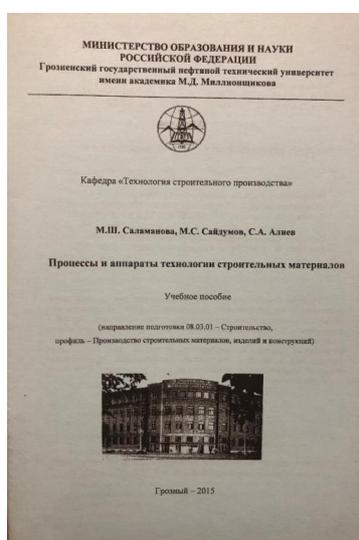


Рисунок 9 — Обложка издания «Процессы и аппараты технологии строительных материалов».

Отдельной «строкой» проходит книга «Тепломассоперенос в технологических процессах строительной индустрии», 2010 [11].

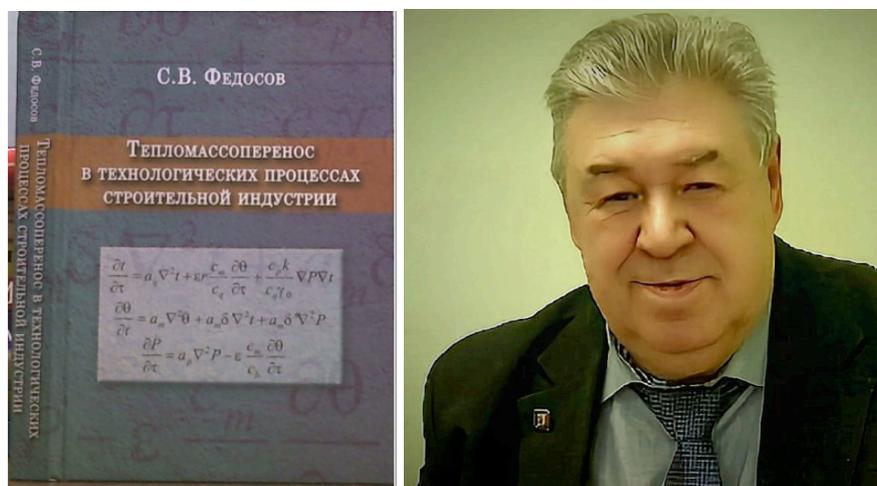


Рисунок 10 — Обложка издания «Тепломассоперенос в технологических процессах строительной индустрии».



Рисунок 11 — Лыков А.В. Теоретические основы строительной теплофизики.

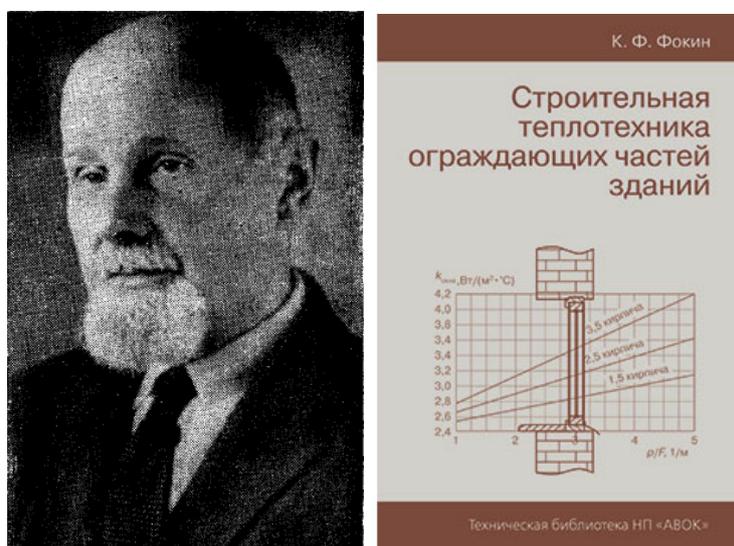


Рисунок 12 — Фокин К. Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий.



Рисунок 13 — Богословский В. Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха).

К сожалению, судьба этого курса, мягко говоря, не получила дальнейшего развития.

Один из немногих ВУЗов, в образовательных программах которого на сегодня остаётся курс «Процессов и аппаратов в технологии строительных материалов», является ГГНТУ имени академика М.Д. Миллионщикова. Он продолжает успешно преподаваться сотрудниками - энтузиастами, которые прекрасно понимают сами, что в настоящих условиях интенсивного развития новых технологий и оборудования явления переноса теплоты и массы вещества позволяют учащимся понимать все нюансы сложных технологических цепочек.

Но, именно появление новых технологий, приборов, методов, материалов и программного обеспечения требуют адекватной реакции на появление новаций и их учёта в методологии изложения традиционного курса, но с новыми элементами учёта требований и науки и практики.

В понимании простого человека – «обывателя» - термин *здание* ассоциируется с понятием «Дом, в котором я живу», т.е., квартира, внутренний комфорт, интерьер, мебель и т.п. А уж затем - как выглядит подъезд, корпус здания, двор? И - как добираться до работы, вокзала (аэропорта)? «За кадром» остаётся огромный пласт невидимой работы, без использования результатов которой здание не сможет быть построено и успешно эксплуатироваться на всех этапах жизненного цикла своего существования. И на всех этапах изыскательских, предпроектных и проектных работ инженеру, проектировщику, монтажнику необходимы знания процессов: гидравлических [10] (для расчётов инженерных систем подачи воды и технологических жидкостей); гидромеханических [9] (для расчёта, проектирования и организации траншейных работ); тепло- и массообменных (для расчётов систем нагрева, охлаждения в технологиях производства строительных материалов и конструкций [13, 19, 20]; осуществления строительно- монтажных работ, в том числе, и в экстремальных условиях жаркого (тропического) или холодного (арктического [15, 16, 17]) климата.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крупский Н.К. Начальные главы учения о проектировании по химической технологии, Петроград, изд. - тип. «Двигатель», 1915. 63 с.
2. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. - М., «Химия», 1971. 784 с.
3. Коновалов Д.П., Фокин Л.Ф. Химические технологии: материалы и процессы химической технологии. – Петроград, Гос. изд-во, 1924. 104 с.
4. Фокин Л.Ф., Павлов К.Ф. Методы расчёта типовой химической аппаратуры. – М., КУБУЧ, 1932. 376 с.
5. Марьямов Н.Б. Тепловая обработка изделий на заводах сборного железобетона. - М., "ВНИИЖелезобетон", 1970. 226 с.
6. Перегудов В.В., Роговой М.И. Тепловые процессы и установки в технологии строительных изделий и деталей. - М., Стройиздат, 1983. 416 с.
7. Ерёмин Н.Ф. Процессы и аппараты в технологии строительных материалов. - М., «Высшая школа», 1986. 280 с.
8. Борщ И.М., Вознесенский В.А., Мухин В.З. Процессы и аппараты в технологии строительных материалов. - Киев: Віща школа. 1981. 296 с.
9. Богданов В.С., Ильин А.С., Семикопенко И.А. Процессы в производств строительных материалов и изделий. - Белгород: Везелина, 2007. 512 с.
10. Белостоцкий А.М., Акимов А.П., Афанасьева И.Н. Вычислительная аэродинамика в задачах строительства. - М.: АСВ, 2017. 720 с.
11. Федосов С.В. Тепломассоперенос в технологических процессах строительной индустрии. - Иваново, ИПК "ПресСто", 2010, 364 с.
12. Саламанова М.Ш., Сайдумов М.С., Алиев С.А. Процессы и аппараты технологии строительных материалов, - Грозный: ГГНТУ, 2015. 98 с.
13. Федосов С.В., Бобылёв В.И. Электротепловая обработка бетона токами промышленной частоты на предприятиях сборного железобетона. Иваново: ИГЭУ, 2016, 336 с.

14. Шмитько Е.И. Процессы и аппараты технологии строительных материалов и изделий. - СПб. "Проспект науки", 2018. 736 с.
15. Головнёв С.Г., Красный Ю.М., Красный Д.Ю. Производство бетонных работ в зимних условиях. Обеспечение качества и эффективность. - М., Инфра-Инженерия, 2012. 336 с.
16. Молодин В.В., Лунёв Ю.В. Бетонирование монолитных строительных конструкций в зимних условиях. - Новосибирск, "НГАСУ", 2006. 300 с.
17. Красновский Б.М. Выполнение бетонных работ: зимнее бетонирование - М.: Издательство Юрайт, 2023. — 286 с.
18. Федосов С.В., Румянцева Е.В., Красильников И.В., Методы теории математической физики в приложениях к проблемам коррозии бетона в жидких агрессивных средах. - М., "АСВ", 2021. 244 с.
19. Федосов С.В., Баканов М.О. Модели и методы высокотемпературной обработки в технологии пеностекла. - М., Изд. "Спутник+", 2021. 301 с.
20. Федосов С.В., Степанова В.Ф., Румянцева В.Е. и др., Коррозия строительных материалов. Проблемы, пути решения. - М., "АСВ", 2022. 400 с.
21. Лыков А.В. Теоретические основы строительной теплофизики. Минск: Изд-во Акад. наук БССР, 1961. 519 с.
22. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. М.: Стройиздат, 1973. 287 с.
23. Богословский В.Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха), М.: Высшая школа, 1970. 376 с.

**АКТУАЛЬНЫЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНО-ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ  
ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭНЕРГОРЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ  
ПРОИЗВОДСТВ И ОБРАЗОВАНИЯ ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКИХ  
СПЕЦИАЛИСТОВ**

**CURRENT FUNDAMENTAL AND APPLIED PROBLEMS OF ENERGY RESOURCE  
EFFICIENCY SUPPORT OF INDUSTRIAL PRODUCTIONS AND ENGINEERING AND  
TECHNICAL SPECIALISTS EDUCATION FOR THE PETROLEUM AND GAS  
CHEMICAL COMPLEX**

**Валерий Павлович Мешалкин**  
**Valery P. Meshalkin**

*Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, Россия, Москва*  
*Mendeleev University of Chemical Technology, Russia, Moscow*

*Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова, Россия, Москва*  
*Institute of General and Inorganic Chemistry named after N.S. Kurnakov RAS, Russia, Moscow*

*Институт физической химии и электрохимии имени А. Н. Фрумкина РАН, Россия, Москва*  
*Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry named after A. N. Frumkin RAS,  
Russia, Moscow,*

*Санкт-Петербургский государственный Технологический институт (Технический  
университет), Россия, Санкт-Петербург*

*St. Petersburg State Institute of Technology (Technical University), Russia, St. Petersburg*  
*(e-mail: vpmeshalkin@gmail.com)*

*Аннотация:* Кратко изложены основные фундаментально-прикладные проблемы успешной реализации научно-технологических и организационно-экономических условий перехода производств нефтегазохимического комплекса (НГХК) к «цифровой экономике» и «экономике замкнутого цикла», или «круговой экономике».

Дана характеристика научно-методологических основ технологического лидерства для обеспечения устойчивого развития предприятий НГХК, которые образуют современные методы и средства интенсификации химико-технологических систем (ХТС), включающие прогрессивные виды химико-технологического оборудования, а также специальные физико-химические и инженерно-технические методы воздействия на технологические потоки.

Изложены основные методы и способы инжиниринга ресурсоэнергосберегающих экологически безопасных химико-технологических процессов и ХТС.

Дана краткая характеристика направлений обеспечения технологического лидерства в технологиях добычи и степени извлечения углеводородного сырья на основе выпуска наукоемких малотоннажных и импортозамещающих реагентов, а также в производстве новых композиционных материалов различного функционального назначения.

Дано определение «технологического суверенитета» технологической независимости России в инжиниринге, реализации и эксплуатации критических энергоресурсоэффективных экологически безопасных природоподобных производственных технологий.

Предложены важные дополнительные меры государственного стимулирования в сфере обеспечения технологического суверенитета и технологического развития на основе использования инновационного налогового вычета.

Подчеркнуто, что важнейшим организационно-политическим фактором обеспечения технологического суверенитета РФ должна являться строго обязательная независимая комплексная экспертиза под руководством членов РАН всех разрабатываемых технических заданий с учётом контрольных показателей энергоресурсоэффективности и экологической безопасности, технико-экономических обоснований новых промышленных производств,

включая все производства по переработке промышленных отходов в продукты с высокой добавленной стоимостью; разработка серии информационно-технических справочников наилучших доступных технологий (НДТ) по переработке промышленных и коммунально-бытовых отходов с учетом показателей энергоресурсоэффективности и устойчивого развития; разработка нормативно-правовых форм стимулирования использования отходов как вторичных материальных ресурсов в условиях «круговой экономики».

Кратко изложены основные направления совершенствования высшего инженерно-технического образования в РФ с учетом достижений всемирно признанной и высоко оцененной методики подготовки высококвалифицированных инженеров-создателей в СССР новых наукоемких технологий, а не потребителей товаров и услуг индустриально развитых государств.

Предложено критически проанализировать и оптимально адаптировать к условиям высшей школы России, разработанную Массачусетским технологическим институтом совместно с рядом Шведских университетов методики «проектного обучения» - методику CDIO (Conceived — Design — Implementation — Operation) — «Задумка» — «Проектирование» — «Реализация» — «Эксплуатация», весьма совпадающую с методикой обучения инженеров в СССР, которая основывалась на активном овладении инженером компетентностями (знаниями, навыками и умениями) решения разнообразных задач на всех этапах жизненного цикла производства и продукции.

*Abstract:* The main fundamental and applied problems of the successful implementation of scientific, technological, organizational and economic conditions for the transition of production of the petrochemical complex (PGCC) to the “digital economy” and “circular economy” are briefly outlined.

The characteristics of the scientific and methodological foundations of technological leadership are given to ensure the sustainable development of oil and gas chemical enterprises, which form modern methods and means of intensifying chemical-technological systems (CTS), including advanced types of chemical-technological equipment, as well as special physical-chemical and engineering-technical methods of influence on technological flows.

The main methods and methods of engineering resource-energy-saving environmentally friendly chemical and technological processes and chemical substances are outlined.

A brief description is given of the areas of ensuring technological leadership in production technologies and the degree of extraction of hydrocarbon raw materials based on the production of high-tech, low-tonnage and import-substituting reagents, as well as in the production of new composite materials for various functional purposes.

A definition are given of “technological sovereignty” of Russia’s technological independence in the engineering, implementation and operation of critical energy-resource-efficient environmentally friendly nature-like production technologies.

Important additional measures of government incentives are proposed in the field of ensuring technological sovereignty and technological development based on the use of innovative tax deductions.

It is emphasized that the most important organizational and political factor in ensuring the technological sovereignty of the Russian Federation should be a strictly mandatory independent comprehensive examination under the leadership of members of the Russian Academy of Sciences of all technical specifications being developed, taking into account benchmark indicators of energy and resource efficiency and environmental safety, feasibility studies of new industrial production, including all production of industrial processing waste into high value-added products; development of a series of information and technical reference books on the best available technologies (BAT) for the processing of industrial and municipal waste, taking into account indicators of energy and resource efficiency and sustainable development; development of regulatory forms for stimulating the use of waste as secondary material resources (SMR) in a “circular economy”.

The main directions for improving higher engineering and technical education in the Russian Federation are briefly outlined, taking into account the achievements of the internationally recognized

and highly valued methodology for training highly qualified engineers who are creators of new high-tech technologies in the USSR, and not consumers of goods and services of industrialized countries.

It is proposed to critically analyze and optimally adapt to the conditions of higher education in Russia the method of “project-based learning” developed by the Massachusetts Institute of Technology together with a number of Swedish universities - the CDIO (Conceived - Design - Implementation - Operation), which is very similar to the methodology of training engineers in the USSR, which was based on the active acquisition by the engineer of competencies (knowledge, skills and abilities) to solve various problems at all stages of the life cycle of production and products..

*Ключевые слова:* интенсификация, энергоресурсоэффективность, инжиниринг, цифровизация, новые композиционные материалы, нефтегазохимический комплекс, технологический суверенитет, технологическая независимость, технологическое лидерство, химико-технологическая система, круговая экономика, меры государственного стимулирования, высшее инженерное образование.

*Keywords:* intensification, energy and resource efficiency, engineering, digitalization, new composite materials, petrochemical complex, technological sovereignty, technological independence, technological leadership, chemical-technological system, circular economy, government incentive measures, higher engineering education.

Для успешной реализации научно-технологических и организационно-экономических условий перехода к «цифровой экономике» и «экономике замкнутого цикла», или «круговой экономике», необходимо решить следующие фундаментально-прикладные проблемы, которые обеспечат технологическое лидерство Российской Федерации [1-4]:

1. Широкая реализация научно-обоснованных физико-химических и аппаратурно-технических инжиниринговых инновационных разработок.

2. Широкое применение на основе ключевых направлений промышленной революции «Индустрия 4.0» инструментов и методов цифровой трансформации технологических и бизнес-процессов в различных направлениях деятельности предприятий:

2.1. Автоматизация ХТП и ХТС; структурирование и анализ информации; организация виртуальной инфраструктуры для хранения данных; формирование центров компетенций по большим данным, их наглядному отображению и анализу.

2.2. Перестраивание процессов управления и повышения профессиональной компетентности работников всех уровней по работе с большими массивами данных; создание виртуальных организационно-управленческих структур с использованием INTERNET, включая «цифровые производства» и «кибер-физические системы» в промышленности; встраивание систем машинного обучения и искусственных нейронных сетей (ИНС) в химико-технологические и бизнес-процессы; разработка многоуровневых систем наглядного отображения больших массивов данных для руководителей различных уровней.

2.3. Применение многоуровневых интеллектуальных систем логистического управления ЦП предприятий, включающих подсистемы добычи сырья; поставок, транспортирования и складирования сырья и энергоресурсов; гибких систем стройного производства; хранения и распределения по рынкам готовой продукции.

2.4. Применение всех видов цифрового взаимодействия между производителями и потребителями различных товаров и услуг в цифровой экономике: B2B, B2C, B2E, B2G.

2.5. Применение гибких автоматизированных малотоннажных многоассортиментных производственных систем.

3. Масштабирование инициативных передовых научно-исследовательских решений на всех этапах ЖЦ производств и готовой продукции. Обеспечение непрерывного обновления и продвижения инициатив в изменениях номенклатуры выпускаемой продукции, а также бизнес-процессов.

4. Реализация преимуществ во внутренней и внешней деятельности предприятий не только в экономическом, природоохранном, но и в социальном направлении в соответствии с целями устойчивого развития, требованиями общественной программы «Responsible Care»,

регламента REACH и наилучших доступных технологий (НДТ–BATBRef), а также современной концепции управления предприятиями ESG (Environmental, Social, Corporate Governance).

5. Для успешного решения сложных задач реализации технологического лидерства необходимо прежде всего выполнять физико–химический инжиниринг молекулярной структуры веществ и мате-риалов, обработки больших массивов экспериментальных физико–химических данных необходимо широко использовать методы и компьютерные инструменты теории искусственного интеллекта, включая ИИС с глубинным обучением, природовдохновленные алгоритмы и метаэвристики; создание интеллектуальных баз больших данных; компьютерное моделирование текстуры нанокompозитов; создания цифровых двойников; цифровизации химико–технологических процессов, систем и цепей поставок химических производств; применения 3D, 4D и 5D принтеров для реализации аддитивных технологий производства специальных композиционных материалов и изделий из них.

6. Широкое применение систем цифровизированной интегрированной информационной логистической поддержки жизненного цикла трубопроводов и всех видов оборудования химических и нефтехимических предприятий на основе применения методологии CALS–технологий на всех этапах производственного цикла, включая операции планирования и управления ремонтным и техническим обслуживанием оборудования.

7. Научно–методологические основы технологического лидерства для обеспечения устойчивого развития предприятий НГХК образуют современные методы и средства интенсификации ХТС, включающие прогрессивные виды химико–технологического оборудования, а также специальные физико–химические и инженерно–технические методы воздействия на технологические потоки [3-5]:

7.1. Основные прогрессивные виды химико–технологического оборудования.

7.1.1. Оборудования для проведения химических реакций (реакторы):

с вращающимся диском,  
вращающиеся с уплотненным слоем насадки,  
со статическим смесителем,  
монолитные,  
микро–,  
теплообменные,  
ультразвуковые газожидкостные,  
распылительные,  
периодические (динамические).

7.1.2. Оборудование для массо– теплообменных и гидродинамических процессов (статические смесители, компактные теплообменники, микроканалные теплообменники, роторные/статорные смесители, центробежные адсорберы с вращающейся насадкой).

7.1.3. Многофункциональные реакторы и комбинированные хемо–массообменные аппараты (реакторы: с обратным потоком, хемодистилляцией, хемо–экстракцией, хемо–кристаллизацией, с хроматографическим или мембранным разделением, мембранная абсорбция и дистилляция, адсорбционная дистилляция).

7.1.4. Аппараты с использованием внешнего воздействия альтернативных источников энергии (центробежные силы, ультразвук, солнечная энергия, микроволны, электромагнитное поле, плазменные технологии) и специальных жидкостей (сверхкритические флюиды, ионные жидкости/расплавы).

Для успешного решения «глобальных вызовов» (изменение климата и рациональное использование природных ресурсов, минимизация углеродного следа; демографические и социальные трансформации) необходимо использовать концепцию «конвергенции Нано–Био–Инфо–Когнитивно–Социальных (НБИКС) технологий»; теоретические основы инжиниринга природоподобных или природовдохновлённых технологий; новые модели интенсивного технологического развития; методы создания и эксплуатации устойчивых

ресурсоэнергоэффективных и экологически безопасных ХТС) в условиях «экономики замкнутого цикла», методологии технологического лидерства необходимо широко использовать следующие основные методы и способы инжиниринга ресурсоэнергосберегающих и экологически безопасных химико–технологических процессов и ХТС [3-7]:

1. Способы наилучшего использования движущей силы химико–технологических процессов, применение принципов «зелёной химии».

2. Способы наиболее полного использования сырья и создания малоотходных экологически безопасных ХТС.

3. Способы наилучшего использования топливно–энергетических ресурсов, включая способы рекуперации вторичных энергоресурсов; применение методов термодинамического «пинч–анализа» для оценки энергоэффективности ХТС.

4. Способы наилучшей организации аппаратурно–технической структуры производств (оптимальное размещение единиц оборудования, оптимальная трассировка трубопроводов, оптимизация структуры технологических потоков в ХТС).

5. Способы обеспечения оптимальной надёжности и экологической безопасности ХТС; способы управления технологическими рисками промышленных производств; методы оценки и минимизации воздействия на ОС промышленных производств.

6. Способы эффективного экологически безопасного использования возобновляемых природных ресурсов и источников энергии.

7. Способы минимизации отходов и ресурсоэнергоэффективной переработки техногенных отходов в ценную продукцию с высокой добавленной стоимостью в условиях «экономики замкнутого цикла».

8. Научное обоснование создания ресурсоэнергоэффективных экологически безопасных социально–ориентированных новых видов организационно–функциональных структур в химическом и нефтехимическом комплексе в соответствии с современной концепцией ESG: промышленные социально–экономические кластеры; экотехнопарки; карбоновые полигоны, карбоновые фермы, зеленые цепи поставок предприятий химического и нефтехимического комплекса; системы замкнутого водооборота предприятий.

Для реализации методологии «технологического лидерства» в области производства лакокрасочных материалов необходимо выполнить физико–химический инжиниринг и реализовать выпуск следующих специальных функциональных материалов: ремонтные материалы для подводного нанесения на влажную поверхность с эффектом водовытеснения; УФ–отверждаемых ремонтных материалов, материалов для ледостойких и противообледенительных и огнестойких (от пожаров углеводородного типа) покрытий; сухих многофункциональных смазочных материалов на основе фторполимеров.

Для обеспечения технологического лидерства в технологиях добычи и степени извлечения углеводородного сырья необходимо обеспечить выпуск следующих наукоемких, малотоннажных и импортозамещающих реагентов:

1. реагенты для повышения нефтеотдачи пласта (полиакриламиды, полисахариды, эмульгаторы и другие поверхностно–активные вещества, реагенты для получения термотропных гелей);

2. реагенты для процесса гидроразрыва пласта (фосфорилированные спирты, халатные соединения, сшиватели, ингибиторы набухания глин);

3. реагенты для кислотных составов – физико–химические системы для кислотных обработок скважин (кислоты, павы, ингибиторы, деэмульгаторы);

4. реагенты для буровых растворов (загустители, полисахариды, эмульгаторы, смазывающие добавки, утяжелители);

5. деэмульгаторы и поверхностно–активные вещества;

6. ингибиторы коррозии, парафиноотложения и гидратообразования.

Для решения проблемы выпуска специальных импортонезависимых малотоннажных продуктов при реализации методологии технологического лидерства необходимо особое внимание уделить производству следующих материалов и специальных реагентов:

1. Композиционные материалы/наноматериалы с ориентированной структурой для приборостроения;
2. функциональные сорбенты для селективного извлечения тяжелых металлов (Краун–эфир) для атомной энергетики;
3. функциональные материалы для получения прозрачной керамики для микроэлектроники;
4. композиционные и функциональные материалы с использованием краун–эфиров (азометиновые краун–эфир) для атомной энергетики;
5. микробиологические индикаторы и красители (производных тетраметилбензидина, флуоресцеина, родамина, тетразолиевых солей) для здравоохранения;
6. люминофоры, термохромные материалы на основе оксидов редкоземельных материалов для защищенной полиграфии, катализаторов и волоконной оптики;
7. полиамидные материалы для аддитивных технологий;
8. неорганические порошки для формования керамики; для сцинтилляторов (тв/жд) для атомной энергетики;
9. композиционные материалы/наноматериалы с ориентированной структурой для энергетики;
10. сверхвысокотемпературная керамика для космической отрасли и для металлооптических систем;
11. малеиновый ангидрид; химические реактивы для аналитических целей; химические реактивы для лабораторного органического синтеза; биохимические реактивы и препараты; диагностические реактивы для научного сервиса, бытовой химии, учебных процессов;
12. радиофармпрепараты для здравоохранения;
13. хелатные комплексы для системы питания растений для агропромышленный комплекс.
14. композиционные покрытия для защиты от воздействия агрессивных природных и техногенных сред.

Важнейшую организационно–экономическую роль в обеспечении ресурсоэнергоэффективности, экологической безопасности и интенсификации производств и предприятий химического и нефтегазохимического комплекса Российской Федерации играют различного вида инновационные научно–инжиниринго–производственно–образовательные организации:

- специальные инжиниринговые центры;
- научные консорциумы;
- вертикально–интегрированные компании (ВИК);
- научно–образовательно–производственные кластеры;
- центры компетенций;
- технопарки и др.

В настоящее время основу научного потенциала химического комплекса Российской Федерации формируют 45 отраслевых научно–исследовательских организаций (институтов). Также прикладными научными исследованиями и разработками в области химических технологий и материаловедения занимаются организации, находящиеся под научно–методическим руководством Российской академии наук и университеты, которые частично восполняют огромный недостаток прикладных разработок, образовавшийся в России в результате сокращения числа отраслевых научно–исследовательских институтов.

В настоящее время взаимодействие производственных химических предприятий со специализированными лабораториями НИИ РАН является весьма недостаточным. Во многих случаях крупные компании предпочитают финансировать даже поисковые исследования,

выполненные своими научными подразделениями и даже заводскими лабораториями, не используя имеющийся научный потенциал НИИ РАН, взаимодействие с которыми может ускорить освоение предприятиями передовых методов интенсификации и повышения ресурсоэнергоэффективности ХТС, что позволит не только оптимизировать и усовершенствовать существующие ХТП, но и расширить номенклатуру выпускаемой высококачественной продукции и её конкурентоспособность, производить необходимые химические реактивы и продукцию тонкого синтеза непосредственно в НИИ РАН. Активное вовлечение руководством государственных корпораций и частных ВИК НИИ РАН в создание новых интенсивных ресурсоэнергоэффективных ХТС должно осуществляться не по остаточному принципу с предпочтением интересов собственных подразделений или зарубежных инжиниринговых центров.

Технологическое лидерство, фундаментально-прикладные основы которого создают ученые НИИ РАН и ведущих Университетов России, является важнейшим актуальным интеллектуальным и научно-технологическим условием достижения технологического суверенитета и технологической независимости России.

Технологический суверенитет – это устойчивое обеспечение мирового технологического лидерства, технологической независимости и технологической самостоятельности России в инжиниринге, реализации и эксплуатации критических энергоресурсоэффективных экологически безопасных природоподобных производственных технологий, либо достижение паритета указанных наукоемких технологий с другими индустриально-развитыми странами в инжиниринге и использовании для производства высокотехнологичных товаров, не имеющих мировых аналогов или их превосходящих.

Важнейшим интеллектуально-организационным фактором достижения Российской Федерации технологического суверенитета являются фундаментальные и прикладные исследования, проводимые в научно-исследовательских институтах РАН и устанавливаемых в Государственном задании на выполнение НИР институтами РАН. Технологическая независимость – это наличие в экономике России собственных наукоемких технологий производства товаров, которые невозможно или экономически нецелесообразно импортировать из других стран.

В качестве важной дополнительной меры государственного стимулирования в сфере технологического развития предлагается использовать инновационный налоговый вычет, представляющий собой возврат предприятиям, осуществляющим реализацию и использование технологических инноваций, дополнительно возникающих при этом НДС и налога на прибыль, которые образуются в случае снижения материалоемкости производства и соответствующем увеличении доли добавленной стоимости в каждой единице выпускаемой продукции. Полученные средства предприятия могли бы использовать, в том числе, для поощрения разработчиков технологических новшеств – соответствующих НИИ и конструкторских бюро [8].

Энергоресурсоэффективные экологически безопасные производства по переработке промышленных отходов в продукцию с высокой добавленной стоимостью для обеспечения успешного перехода к экономике «замкнутого цикла», или «круговой экономике» и устойчивому технологическому суверенитету РФ должны снижать материалоемкость выпускаемой продукции, в том числе её энергоёмкость и, соответственно, углеродный след.

Следовательно, для их инжиниринга и реализации энергоресурсоэффективных производств по переработке промышленных отходов, с одной стороны, необходимо разработать нормативы поэтапного снижения материалоемкости в основных отраслях, образующих промышленные отходы, которые должны быть индикаторами для предприятий при использовании наилучших доступных технологий (НДТ) переработки отходов. С другой стороны, для стимулирования процессов инжиниринга и применения в экономике таких НДТ необходимо использовать налоговый вычет на объем прироста налогов на прибыль и налог на добавленную стоимость (НДС), возникающий у предприятий вследствие снижения материалоемкости. Порядок определения НДС и контроль за его исполнением необходимо

предусмотреть при заключении с соответствующими предприятиями долгосрочных специальных инвестиционных контрактов.

Важным организационно-политическим фактором обеспечения технологического суверенитета РФ должна являться строго обязательная независимая комплексная экспертиза под руководством членов РАН всех разрабатываемых технических заданий с учётом контрольных показателей энергоресурсоэффективности и экологической безопасности, технико-экономических обоснований новых промышленных производств, включая все производства по переработке промышленных отходов в продукты с высокой добавленной стоимостью. Разработка серии информационно-технических справочников НДТ по переработке промышленных и коммунально-бытовых отходов с учетом показателей энергоресурсоэффективности и устойчивого развития.

В соответствии с требованиями законодательства с 2014 года в Российской Федерации осуществляется переход к наилучшим доступным технологиям (НДТ), который направлен на отказ от устаревших технологий, повышение энергоресурсоэффективности и экологической безопасности промышленности и формирование «экономики замкнутого цикла».

НДТ представляют собой совокупность технологических, технических и организационно-управленческих решений, практическая реализация которых помогает отечественным предприятиям добиваться снижения материалоемкости и повышения энергоресурсоэффективности, сокращения негативного воздействия на окружающую среду (в том числе – снижения выбросов парниковых газов) экономически приемлемыми технологическими методами.

Научно-обоснованное определение понятий НДТ и координацию разработки российских информационно-технических справочников (ИТС) по НДТ многие годы успешно осуществляет национальное Бюро наилучших доступных технологий, функции которого выполняет Научно-исследовательский институт «Центр экологической промышленной политики» (ФГАУ «НИИ «ЦЭПП»). Бюро НДТ творчески сотрудничает с Российской академией наук.

Члены Отделения Химии и наук о материалах РАН активно выполняют следующие виды научно-методической и научно-организационной деятельности:

- участвуют в работе отраслевых Технических рабочих групп, которые создают ИТС НДТ и национальные стандарты (<https://burondt.ru/itc/>);
- методологически поддерживают создание оригинальной многотомной Энциклопедии технологий (<https://anoire.center/>);
- участвуют в реализации проекта «Зелёные ситуационные исследования» (см., например, [https://eipc.center/wp-content/themes/fgau/publics/greenwashing\\_anatomy.pdf](https://eipc.center/wp-content/themes/fgau/publics/greenwashing_anatomy.pdf));
- готовят совместные статьи для опубликования в высокорейтинговых российских и зарубежных изданиях.

В резолюции традиционного конгресса «ТЕХНОГЕН–2023» отмечено, что необходимо особое внимание уделять разработке нормативно-правовых форм стимулирования использования отходов как вторичных материальных ресурсов (ВМР) в условиях «круговой экономики»:

разработка механизмов приоритетного использования продукции, полученной с использованием ВМР, при осуществлении закупок для государственных и муниципальных нужд;

разработка стимулирующих мер для производителей продукции, использующих при производстве ВМР (налоговое стимулирование пр.);

при разработке «зеленых» стандартов в промышленности предусмотреть требования (включая добровольные и обязательные критерии) к использованию перерабатываемых отходов на всех этапах жизненного цикла промышленных производств;

пересмотреть базовые нормативы платы за размещение на полигонах отходов и коэффициенты дифференциальных нормативов для принципиального стимулирования переработки промышленных отходов.

В настоящее время, учеными Института экономических проблем им. Г.П. Лузина (ИЭП КНЦ РАН) совместно с учеными РХТУ имени Д.И. Менделеева и Лаборатории Мирового уровня по энергоресурсоэффективным технологиям переработки промышленных отходов СПбГТИ(ТУ) разработаны теоретико-методологические основы управления устойчивым и эффективным развитием промышленности регионов, включающие формирование целевых показателей, критериев и индикаторов уровней устойчивости развития производства отдельных технологических процессов и технологий, предприятий, отраслей производства, видом промышленной деятельности, а также обоснование метода бальной оценки количественного измерения уровней устойчивости (неустойчивости) и расчета индекса устойчивости промышленных систем различного уровня иерархии управления, которые получили высокую международную оценку.

Впервые в мировой науке установлена прямая взаимосвязь между циклическим развитием технологий производства и устойчивостью развития производственных систем и сформированы целевые показатели устойчивого инновационно-технологического направления развития.

На основе разработанных критериев это позволило выделить в технологическом развитии производственных систем три стадии устойчивости и три стадии неустойчивости, определить для каждой стадии индикаторы уровней устойчивости/неустойчивости, разработать бальный метод количественного измерения этих уровней и обосновать расчет общего индекса устойчивости для производственных систем любого уровня иерархии управления.

Предложенная методология практически успешно применена для анализа показателей эффективности развития нескольких крупных промышленных арктических предприятий и промышленности регионов Арктической Зоны РФ. Полученные научные результаты внесут существенный вклад в развития концепции устойчивого развития, а также найдут практическое использование в разработке стратегических направлений устойчивого социально-экономического развития российской Арктики.

Для успешного выполнения целей и основных задач формируемой Федеральной Научно-технической Программы (ФНТП) в области экологического развития и климатических изменений на 2021-2030 гг., которая создана в соответствии с Указом Президента РФ от 08.02.2021 г. №76, членами Отделения Химии и Наук о Материалах РАН, предложено включить в паспорт ФНТП нового специального Комплексного научно-технического проекта (КНТП): «Научно-технические решения по разработке экологически безопасных энергоресурсоэффективных технологий переработки производственных отходов». Выполнение предлагаемого КНТП ориентировано на разработку научных основ и создание опытных производств по переработке отходов химического, нефтегазохимического, биохимического радиоэлектронного, металлургического, ядерно-химического и сельскохозяйственного комплекса; по декарбонизации экономики и улучшению состояния окружающей среды.

Предложены следующие основные рубрики и конкретные НИОКР нового КНТП, полностью соответствующие направлению №1 ФНТП «Смягчение антропогенного воздействия на окружающую среду»: 1. Минимизация образования производственных отходов; 2. Экологически безопасные технологии переработки производственных отходов; 3. Цифровизация технологий переработки производственных отходов и систем мониторинга загрязнений окружающей среды.

Заявляемый новый дополнительный специальный КНТП в составе паспорта ФНТП будет выполняться на основе сотрудничества НИИ РАН с ведущими Университетами России, Государственными корпорациями и частными компаниями под научно-организационно-методическим руководством Отделения химии и наук о материалах РАН.

Предлагаемый КНТП будет представлять собой совокупность проектов НИОКР полного цикла (от ИДЕИ до ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА) в сфере снижения антропогенного воздействия на окружающую среду, экологически безопасного обращения с отходами,

разработки энергоресурсоэффективных производств с минимальными отходами и цифровизированных систем охраны окружающей среды от химических загрязнений.

Для успешного выполнения фундаментально-прикладных НИР по инжинирингу и логистическому управлению эксплуатацией энергоресурсоэффективных экологически безопасных производств нефтегазохимического комплекса (НГХК), представляющий собой сложные химико-технологические системы (ХТС) и цепей поставок НГХК необходимы кадры высококвалифицированных компетентных специалистов в области химии, химического инжиниринга, инжиниринга ХТС, логистики ресурсоэнергосбережения, химической технологии, технологической инноватикой и цифровизированных ХТС.

В начале декабря 2023 г. на общем собрании членов РАН были названы три ведущих университета РФ, которые отвечают за постоянное совершенствование и устойчивое развитие следующих основных направлений высшего образования в РФ: МГУ им. М.В. Ломоносова – математика и биология; МФТИ – физика; РХТУ им. Д.И. Менделеева – химия и химическая технология.

По инициативе академика РАН Саркисова П.Д. – ректора РХТУ имени Д.И. Менделеева, в 2001 году было открыто в Российской Федерации новое направление многоуровневой подготовки кадров «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии».

В настоящее время по этому направлению активно ведется подготовка бакалавров технологии и магистров технологии в РХТУ имени Д.И. Менделеева, Казанском национальном исследовательском технологическом университете, Ивановском государственном химико-технологическом университете, Уфимском государственном нефтяном технологическом университете, в Санкт-Петербургском Государственном технологическом институте (ТУ).

Кафедра Логистики и Экономической Информатики (ЛогЭКИ) РХТУ имени Д.И. Менделеева с 2001 года обучает бакалавров технологии и магистров технологии, активно используя при составлении основных образовательных программ (ООП) по направлению «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии».

Следует особо подчеркнуть, что важнейшие разделы ООП по уникальной специальности “Chemical Process Engineering” (Инжиниринг Химико-Технологических Систем), которые разработаны и активно используются в ряде ведущих университетов мира: Imperial College (London, UK), University Polytechnic of Catalonia (Spain), South Bank Polytechnic University (London, UK), The University of Manchester (UK), Carnegie Mellon University (USA), в значительной степени совпадают с ООП по направлению «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии нефтехимии и биотехнологии».

Выпускники кафедры ЛогЭКИ – бакалавры и магистры, получая один диплом, имеют фактически три квалификации — «технолога», «логиста» и «управленца–организатора», поэтому они могут успешно решать сложные важные задачи повышения экономической эффективности и конкурентоспособности ХТС, предприятий и цепей поставок химического и нефтегазохимического комплекса в условиях цифровой экономики, имеющие важнейшее значение для достижения технологического суверенитета России:

- инжиниринг оптимальных технологических схем и автоматизированных систем управления эксплуатацией энергоресурсосберегающих производств и цепей поставок; управление проектами по инжинирингу энергоресурсосберегающих экологически безопасных производств и цепей поставок НГХК;
- анализ и управление производственными, финансовыми и экологическими рисками промышленных предприятий и цепей поставок, методы интенсификации химико–технологических процессов ХТС;
- составление планов стратегического, тактического и оперативного управления энергоресурсосбережением на промышленных предприятиях и в цепях поставок НГХК; организация цифровизации производства НГХК;

- организация и проведение энергетического аудита на промышленных, коммерческих и коммунально–бытовых предприятиях;
- оптимизация энергоресурсоэффективности производств, предприятий и цепей НГХК и малотоннажной химии;
- выбор и практическое использование корпоративных информационных систем логистического управления технологическими процессами, бизнес–процессами и материальными ресурсами предприятий, инжиниринг логистических систем управления «зелеными» цепями поставок продукции НГХК.

Для успешной реализации основных целей устойчивого развития человечества и создания безотходной, или «круговой», цифровой экономики в условиях промышленной революции «Индустрия 4.0» с учётом концепции конвергенции «Нано-Био-Информационно-Когнитивно-Социальных» (НБИКС) технологий необходимо особое внимание уделять проведению фундаментальных и прикладных НИР в области инжиниринга высокоинтенсивных энергоресурсоэффективных химических технологий и экологически безопасных ХТС, по следующим приоритетным направлениям, которые в 2019 г. приняты решением XXI Менделеевского съезда, по предложению членов секции Съезда «Энергоресурсоэффективность, экологическая безопасность и управление рисками производств, предприятий и цепей поставок НГХК»:

- методы интенсификации, комбинирования и минитюаризации ХТП;
- методы цифровизированного инжиниринга и логистического управления эксплуатацией энергоресурсоэффективных экологически безопасных наукоёмких химико-технологических систем и ЦП предприятий химического, нефтегазохимического, биохимического, фармацевтического и химико-металлургического комплекса;
- методы и способы рационального природопользования с широким применением возобновляемых природных ресурсов;
- методы комбинированной энергоресурсоэффективной экологически безопасной переработки промышленных и коммунальных бытовых отходов, и стоков;
- методы цифровизированного инжиниринга безотходных природоподобных ХТП и ХТС и инжиниринг «зелёных» ЦП в реальном секторе экономики;
- методы многомасштабного компьютерного моделирования ХТП, структуры веществ и композиционных материалов;
- методы компьютерной оптимизации и автоматизированного синтеза энергоресурсоэффективных ХТС и ЦП;
- методы инжиниринга цифровизированных робото-кибернетических интеллектуальных производств и предприятий химического, нефтегазохимического, биохимического, фармацевтического и химико-металлургического комплекса;
- методы компьютерной оценки воздействия на ОС техногенных систем;
- методы оценки энергоресурсоэффективности этапов жизненного цикла продукции НГХК;
- методы минимизации экологических, производственных, предпринимательских и финансовых рисков для предприятий химического, нефтегазохимического, биохимического, фармацевтического и химико-металлургического комплекса.

Учёные-химики и химики-технологи, работающие в НИИ Российской Академии Наук и в российских университетах совместно с членами РосСНИО РХО имени Д.И. Менделеева должны особое внимание уделять постоянному совершенствованию и актуализации на основе всестороннего использования современных достижений теоретической и прикладной химии, теории инжиниринга энергоресурсоэффективных ХТС, а так же цифровизированных инструментов промышленной революции «Индустрия 4.0» программ многоуровневого химического и химико-технологического образования при подготовке высококвалифицированных компетентных кадров для обеспечения устойчивого технологического суверенитета Российской Федерации.

Для совершенствования высшего инженерно-технического образования в РФ необходимо вспомнить, переосмыслить и применить всемирно признанную и высоко оцененную методику подготовки высококвалифицированных инженеров создателей новых наукоемких технологий, а не потребителей товаров и услуг индустриально развитых государств, в СССР.

Кроме того, весьма целесообразно критически проанализировать и оптимально адаптировать к условиям высшей школы России, разработанную Массачусетским технологическим институтом совместно с рядом Шведских университетов методики «проектного обучения» - методику CDIO (Conceived — Design — Implementation — Operation) — «Задумка» — «Проектирование» — «Реализация» — «Эксплуатация».

Необходимо особенно подчеркнуть, что эта методика CDIO во многом весьма совпадает с методикой обучения инженеров в СССР, которая основывалась на активном овладении инженером компетентностями (знаниями, навыками и умениями) решения разнообразных задач на всех этапах жизненного цикла производства и продукции.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. State of the art and research development prospects of energy and resource-efficient environmentally safe chemical process systems engineering / V.P. Meshalkin, A.V. Belyakov, O.B. Butusov, Vincenzo G. Dovi, V.I. Bobkov, A.V. Garabadzhiu, T.F. Burukhina, S.M. Khodchenko [et al.] // *Mendeleev Communications*. – 2021. – Vol. 31, No. 5. – P. 593-604. – DOI 10.1016/j.mencom.2021.09.003. (Современное состояние и перспективы развития энергетических и ресурсоэффективных экологически безопасных химических технологических систем/ Мешалкин В.П., Винченцо Дж. Дови, Бобков В.И., Беляков А.В., Бутусов О.Б., Гарабаджиу А.В., Бурухина Т.Ф., Ходченко С.М. // *Mendeleev Communications*. – 2021. – Том 31, № 5. – с. 593-604.)
2. I.E. Grossmann, I. Harjunoski. *Computers and Chemical Engineering*. 2019. 126. 474 doi:10.1016/j.compchemeng.2019.04.028.
3. В.П. Мешалкин. Ресурсоэнергоэффективные методы энергообеспечения и минимизации отходов нефтеперерабатывающих производств: основы теории и наилучшие практические результаты (Resource-efficient methods of energy supply and minimization of waste in oil refineries: theoretical foundations and best practical results, in Russian). М., Генуя: Химия. 2010. – 393 с. – ISBN 978-5-98109-083-7.
4. Мешалкин, В. П. Введение в инжиниринг энергоресурсосберегающих химико-технологических систем / В. П. Мешалкин. – Москва: Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, 2020. – 208 с.
5. Мешалкин В.П. Основы интенсификации и ресурсоэнергоэффективности химико-технологических систем / В.П. Мешалкин. – Смоленск: Принтэкспресс, 2021. - 442 с.
6. Мешалкин В.П., Дли М.И. Логистика и управление конкурентоспособностью предприятий нефтехимического комплекса. – М.; Генуя : Химия. 2010. – 452 с.
7. European Roadmap for process Intensification URL: [https://efce.info/efce\\_media/-p-531.pdf](https://efce.info/efce_media/-p-531.pdf) [Retrieved 21.01.2021].
8. Meshalkin V.P., Zharov V.S., Leontiev L.I., Nzioka A.M., Belozersky A.Y. Sustainable Environmental Impact Assessment Using Indicators for Sustainable Energy-Intensive Industrial Production. *Energies*. 2023; 16(7):3172. <https://doi.org/10.3390/en16073172>. (Мешалкин В.П., Жаров В.С., Леонтьев Л.И., Нзиока А.М., Белозерский А.Ю. Оценка устойчивого воздействия на окружающую среду с использованием показателей устойчивого энергоемкого промышленного производства. *Energies*. 2023 г.; 16(7):3172. <https://doi.org/10.3390/en16073172>).

**ИНСТРУМЕНТЫ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ  
ЭКСТРАКЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**  
**TOOLS FOR CREATING HIGH-EFFICIENCY EXTRACTION TECHNOLOGIES**

**Андрей Алексеевич Вошкин**  
**Andrey A. Voshkin**

*Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Россия, Москва*  
*Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry RAS, Russia, Moscow*  
*(e-mail: aav@igic.ras.ru)*

*Аннотация:* Рассмотрены вопросы применения перспективных экстракционных систем для разработки технологий замкнутого цикла.

*Abstract:* The questions of application of perspective extraction systems for the development of closed-cycle technologies are considered.

*Ключевые слова:* жидкостная экстракция, глубокие эвтектические растворители, ионные жидкости, технологии замкнутого цикла.

*Keywords:* liquid-liquid extraction, deep eutectic solvents, ionic liquids, closed-loop technologies.

Разработка химико-технологических процессов разделения компонентов жидких смесей является задачей, актуальность которой возрастает с каждым годом. Особое значение эти процессы имеют для создания новых высокоэффективных технологий замкнутого цикла, обеспечивающих рециклинг стратегически важных металлов, необходимых для создания широкого спектра функциональных материалов. Одним из наиболее доступных, универсальных и эффективных методов извлечения, разделения и очистки веществ является жидкостная экстракция. Очевидно, что сложность задач разделения и важность соблюдения требований экологической безопасности диктуют необходимость разработки новых гетерогенных систем жидкость – жидкость.

За последние годы предложен ряд экстракционных систем, которые могут заменить классические для жидкостной экстракции органические растворители (керосин, гексан, толуол и т.п.). Благодаря своим, зачастую уникальным, физико-химическим свойствам гетерогенные системы на основе глубоких эвтектических растворителей обеспечивают новые степени свободы в управлении селективностью экстракционного разделения.

Особо следует отметить новые решения в аппаратном оформлении гидрометаллургических процессов разделения смесей, что имеет первостепенное значение в решении вопросов импортозамещения и технологической независимости Российской Федерации.

#### **Выводы**

Таким образом, в докладе будут представлены современные данные по актуальным подходам к синтезу и применению экстракционных систем, а также перспективных российских аппаратных решений, отвечающих ключевым требованиям ресурсо- и энергосбережения [1–9]. Особое внимание будет уделено новому типу экстрагентов (растворителей) – глубоким эвтектическим растворителям.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 20-13-00387, <https://rscf.ru/project/20-13-00387/>.*

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Milevskii, N.A., Zinov'eva, I.V., Kozhevnikova, A.V., Zakhodyaeva, Y.A., Voshkin, A.A. Sm/Co Magnetic Materials: A Recycling Strategy Using Modifiable Hydrophobic Deep Eutectic Solvents Based on Trioctylphosphine Oxide // *International Journal of Molecular Sciences*. 2023. 24(18). 14032
2. Kozhevnikova A.V., Zinov'eva I.V., Zakhodyaeva Yu.A., Baranovskaya V.B. and Voshkin A.A. Application of hydrophobic deep eutectic solvents in extraction of metals from real solutions obtained by leaching cathodes from end-of-life Li-Ion batteries // *Processes*. 2022. 10(12). 26711.
3. Milevskii N.A., Zinov'eva I.V., Zakhodyaeva Y.A., Voshkin A.A. Separation of Li(I), Co(II), Ni(II), Mn(II), and Fe(III) from hydrochloric acid solution using a menthol-based hydrophobic deep eutectic solvent // *Hydrometallurgy*. 2022. 207. 105777.
4. Zinov'eva I. V. et al. Extraction of Cu(II), Ni(II), and Al(III) with the Deep Eutectic Solvent D2EHPA/Menthol // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2022. 56(2). 221–229.
5. Zakhodyaeva Y.A., Zinov'eva I.V., Tokar E.S., Voshkin A.A. Complex extraction of metals in an aqueous two-phase system based on poly(ethylene oxide) 1500 and sodium nitrate // *Molecules*. 2019. 24. 4078.
6. Федорова М.И., Заходяева Ю.А., Баранчиков А.Е., Кренев В.А., Вошкин А.А. Экстракционная переработка Fe, Ni-содержащих элементов Ni-MH аккумуляторов с использованием систем с полипропиленгликолем 425 // *Журнал неорганической химии*. 2022. 67(7). 1000.
7. Zakhodyaeva Y.A., Voshkin A.A., Izyumova K.V., Solov'eva M.S. Extraction separation of the components of leach liquors of batteries. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2017. 51(5). 883.

УДК 004.9: 303.732.4: 628.16: 65.014: 661.11: 681.518

DOI: 10.37816/eeste-2024-p-50-61

**СИСТЕМНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА РАЗРАБОТКИ И  
ПРОИЗВОДСТВА ХИМИЧЕСКИХ РЕАКТИВОВ И ОСОБО ЧИСТЫХ ВЕЩЕСТВ  
SYSTEM STUDIES OF THE LIFE CYCLE OF DEVELOPMENT AND PRODUCTION OF  
CHEMICAL REACTIVES AND HIGH PURITY SUBSTANCES**

**Аркадий Маркович Бессарабов  
Arkadiy M. Bessarabov**

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

*Аннотация:* По проекту Минпромторга России проведена разработка координирующего органа для производства реактивной и особо чистой продукции. Рекомендовано объединение науки и производства в научно-промышленные кластеры. Разработаны основные структуры управления и созданы цифровые двойники для кластера, созданного на основе завода АО «ЭКОС-1» и Научного центра «Малотоннажная химия». Приведены основные работы по разработке гибких производств, компьютерному менеджменту качества и экологии.

*Abstract:* According to the project of the Ministry of Industry and Trade of Russia, the development of a coordinating authority for the production of reactive and high-purity products was carried out. It is recommended to combine science and production into scientific and industrial clusters. Basic management structures have been developed and digital twins have been created for the cluster created on the basis of the JSC EKOS-1 plant and the R&D Centre "Fine Chemicals". The main works on the development of flexible production, computer-based quality management and ecology are presented.

*Ключевые слова:* химические реактивы, особо чистые вещества, малотоннажная химия, цифровые двойники, гибкие производства, аналитический мониторинг, водное хозяйство.

*Keywords:* chemical reactives, high purity substances, fine chemistry, digital twins, flexible production, analytical monitoring, water management.

### **Введение**

Химические реактивы и особо чистые вещества (ХР-ОСЧВ) во многом определяют развитие наиболее инновационных отраслей промышленности. Химико-технологические производства ХР-ОСЧВ – одни из наиболее сложных кибернетических систем в химической промышленности. Они включают в себя всю совокупность процессов, относящихся к производству жидкофазных ОСЧВ, а также широкий класс процессов синтеза, выделения и термообработки, характерных для специфики твердофазных продуктов [1].

Основные исследования в области кибернетики химико-технологических процессов в промышленности химических реактивов и особо чистых веществ проводились по следующим 4-м направлениям [2]: моделирование и оптимизация технологических процессов получения ХР-ОСЧВ; синтез гибких многоассортиментных производств; автоматизация научных исследований и процессов (АСНИ, АСУ ТП); системный анализ и информационные технологии (базы данных, CALS-технологии, цифровые двойники, компьютерный менеджмент качества и др.). Четвертое направление, развивающееся в последние годы, и является целью данной работы. Причем, в этом направлении системные исследования проводились на всех уровнях иерархии: подотрасль, предприятие, технология.

По заданию Минпромторга России нами был проведен анализ российского и зарубежного рынка по подотрасли ХР-ОСЧВ (Государственный контракт № 14411.9990019.13.075 «Разработка рекомендаций по развитию малотоннажной химии для

обеспечения высокотехнологичных отраслей промышленности особо чистыми веществами и химическими реактивами»). В рамках этого контракта проведена разработка функциональной структуры государственного координирующего органа [3].

#### 1. Разработка координирующего органа по ХР-ОСЧВ

На основе систематизации и экспертного анализа были выделены 6 функциональных кластеров координирующего органа: информация, стандартизация, аудит и экспертиза, координация, экономическое планирование, рекомендации и распоряжения (рисунок 1). Информационный кластер связан со следующими 4-мя направлениями: сбор, обобщение информации относительно потребности отраслей народного хозяйства в химических реактивах и особо чистых веществах; информация об имеющихся в стране производственных площадях, мощностях частных и государственных предприятий, которые имеют возможность производства (или производят) ХР-ОСЧВ; информация об имеющихся в стране частных и государственных предприятиях, которые могут производить технологическое и вспомогательное оборудование для получения ХР-ОСЧВ, а также тары, упаковки, оснастки и др.; информация об имеющихся в стране государственных и частных организациях, ведущих научно-исследовательскую деятельность, проектную и внедренческую работу в области производства ХР-ОСЧВ.



Рисунок 1 — Функциональная структура координирующего органа ХР-ОСЧВ

Одним из перспективных направлений обеспечения экономики реактивами и материалами особой чистоты является более тесное объединение науки и производства. Рассматривается совместная работа промышленного предприятия АО «ЭКОС-1» и созданного на его основе АО Научный центр «Малотоннажная химия» (рисунок 1). Получившийся научно-производственный кластер (НПК) является одним из лидеров российского рынка химических реактивов и особо чистых веществ [3].

#### 2. Система управления научно-промышленным комплексом ХР-ОСЧВ

Стабильное качество продукции АО «ЭКОС-1» (рисунок 2) обеспечивается благодаря современному многопрофильному оборудованию. Организован непрерывный лабораторный контроль от поставки сырья до отгрузки готовой продукции. Создана развитая производственная инфраструктура и система логистики [4].



Рисунок 2 — Производственный комплекс АО «ЭКОС-1» (Старая Кулавна, МО).

Учитывая потребности АО «ЭКОС-1», Научный центр «Малотоннажная химия» специализируется на разработках полного цикла: от идеи до внедрения технологических решений. Специалисты центра занимаются научными разработками для микроэлектроники, фармацевтики, авиационно-космической отрасли и военно-промышленного комплекса.

В системе управления НПК используются основные организационные структуры. Верхний уровень управления представляет собой линейно-штабную структуру, в которой строгая подчиненность низшего звена управления высшему (жесткая иерархия). В развитие линейной структуры введены штабы – группы советников (научно-технический и ученый советы, координационный орган). Входящие в линейно-штабную систему функциональные структуры управления нацелены на выполнение постоянно повторяющихся рутинных задач (кадры, финансы и др.), не требующих оперативного принятия решений.

Для выполнения крупных проектов в НПК широко используются матричные структуры управления [4]. Одним из характерных примеров является разработка важнейшей выходной документации – технологических регламентов. В матричной структуре все 14 разделов регламента распределены по 6 основным акторам АО «ЭКОС-1»: главный инженер, начальник производства, отдел охраны труда и техники безопасности, отдел стандартизации, отдел производственных процессов, отдел КИПиА. Для матричной схемы, применяемой в НПК, структура подчинения имеет два уровня: административный (руководитель проекта) и функциональный (специалисты). Функциональный руководитель отвечает за качество отдельных этапов работы, а руководитель проекта – за весь проект.

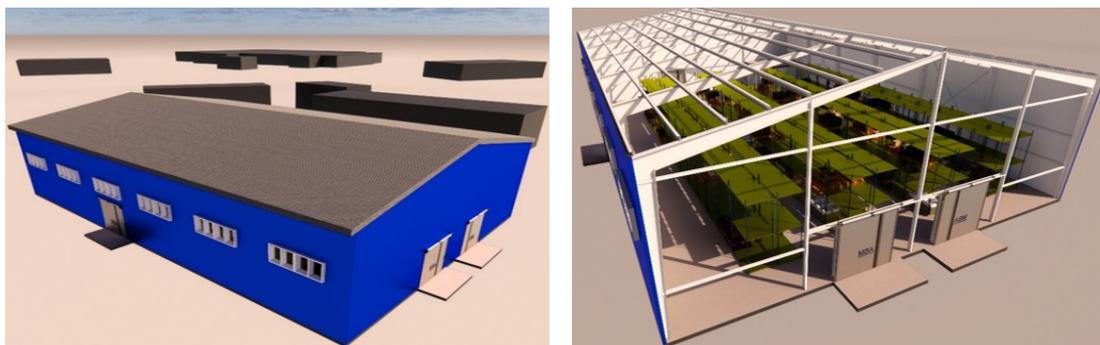
В службе сбыта НПК используется дивизионально-продуктовая структура управления. При этом полномочия, связанные со сбытом конкретных групп важнейшей продукции, передаются конкретным ведущим специалистам, которые становятся ответственными за соответствующий ассортимент выпускаемых АО «ЭКОС-1» материалов. Дивизиональная организационная структура управления применена в службах снабжения и сбыта НПК и ориентирована непосредственно на важнейших поставщиков и потребителей, вокруг которых формируется группировка подразделений для оптимального взаимодействия.

Организационное развитие, связанное с управлением изменениями, базируется на двух методах Гарвардской школы бизнеса (Michael Beer, Nitin Nohria): «Теория E» и «Теория O». В системе управления АО «ЭКОС-1» используется наиболее распространенный в России первый метод (E). В его основе лежит жесткий механистический подход и осуществление перемен «сверху – вниз», что приносит быструю финансовую отдачу. В настоящее время начинает выходить на первое место «Теория O». Она основана на большей роли в процессах преобразования человеческого фактора. Это связано с обучением и развитием сотрудников, изменением корпоративной культуры управления, проведением изменений «снизу – вверх».

### **3. Разработка цифровых двойников АО «ЭКОС-1» и Научного центра**

Одним из путей инновационного развития и модернизации является создание цифрового двойника (Digital Twin) НПК малотоннажной химии. Цифровые двойники представляют собой виртуальные копии объектов, процессов или систем, которые создаются с помощью компьютерного моделирования, симуляции и методов анализа данных [5].

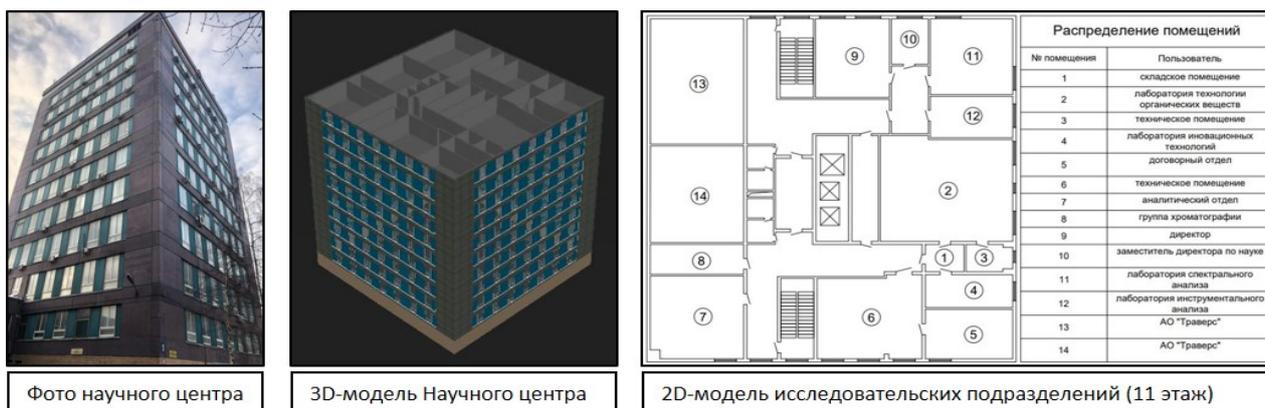
Разрабатывается цифровой двойник предприятия АО «ЭКОС-1», включающий проектную 3D-модель и базы данных по элементам модели [6]. На первом этапе работа была сосредоточена на направлении «Складской комплекс», которому принадлежат 6 складов для сырья и готовой продукции. С применением программного обеспечения Autodesk Revit были построены 3D-модели складов (рисунок 3).



**Рисунок 3** — Виртуальное моделирование складского комплекса АО «ЭКОС-1».

На следующем этапе более подробно моделируется внутренняя составляющая склада. Все модели максимально похожи на оригинальные объекты. 3D-модели интегрируются в среду разработки Unity 3D для создания виртуального пространства склада. Создано новое множество 3D-моделей специализированного оборудования (погрузчики, стеллажи, коробки, паллеты и др.) и тары (канистры, бутылки и др.). Разработанная виртуальная модель складского хозяйства позволяет осуществлять более быстрый поиск информации, минимизирует время складских операций и экономит трудовые ресурсы.

В настоящее время проводятся работы по созданию цифрового двойника Научного центра «Малотоннажная химия» [7]. На первом этапе разработана 3D-модель здания, в котором расположен Научный центр (рисунок 4). На последнем 11-м этаже расположены исследовательские подразделения (2D-модель). Их расположение отражено в 3D-модели.



**Рисунок 4** — Виртуальная 3D-модель Научного центра «Малотоннажная химия».

Аналитические лаборатории Научного центра (рисунок 5) 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 технологического производства.

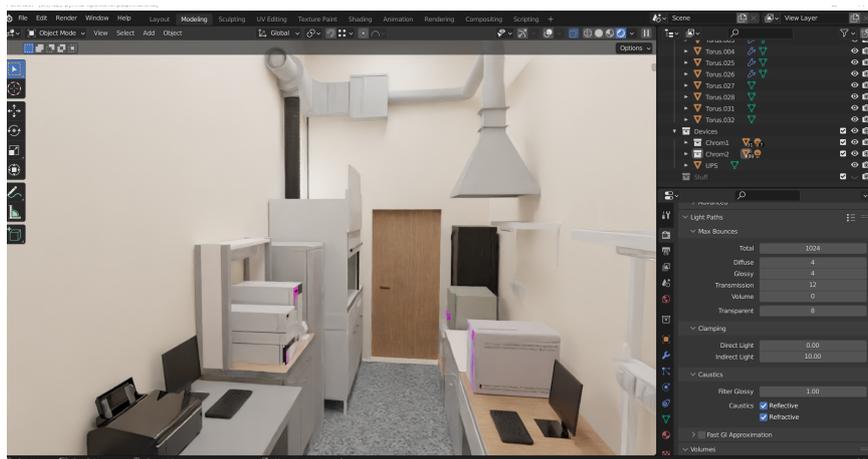


Рисунок 5 — 3D-модель лаборатории хроматографического анализа (Blender).

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 5 приведен пример одного из этапов разработки 3D-модели лаборатории хроматографии. Системой компьютерной поддержки является Blender (Blender Foundation, Нидерланды). Это мощный профессиональный инструмент, для комплексного 3D моделирования, осуществления анимации сцен и рендеринга визуальных эффектов. Использование Blender позволило создать цифровой двойник аналитической лаборатории, который можно использовать для имитации внутренних рабочих процессов.

#### 4. Автоматизированный синтез гибких модульных производств

Учитывая широкий ассортимент ХР-ОСЧВ и использование (в основном) периодических процессов, наиболее рациональным направлением технического перевооружения является создание гибких технологических систем с использованием в качестве элементной базы специализированных аппаратных модулей [8]. Для решения этих задач на всех этапах жизненного цикла наукоемкой продукции применяется система компьютерной поддержки – CALS-технология (Continuous Acquisition and Life cycle Support – непрерывная информационная поддержка жизненного цикла продукта) [9].

При разработке структуры гибких производств по типовой методологии решаются вопросы совмещения выпускаемых продуктов. При этом учитывается: химический состав целевого продукта, его класс и состав лимитируемых примесей; способ получения продукта и реализации технологического процесса; типы используемого оборудования.

На АО «ЭКОС-1» проведена декомпозиция ассортимента по технологическому сходству, химическому сходству и классам целевых продуктов. В результате для разработки гибких производств выбраны 2 группы продуктов: алифатические углеводороды реактивных квалификаций [10] и неорганические кислоты ОСЧ [8]. Выбор данных ассортиментов обусловлен отношением целевых продуктов к разным классам химических веществ (неорганические, органические) и к разным квалификациям чистоты (реактивные, ОСЧ).

##### 4.1. Разработка гибкого производства органических химических реактивов

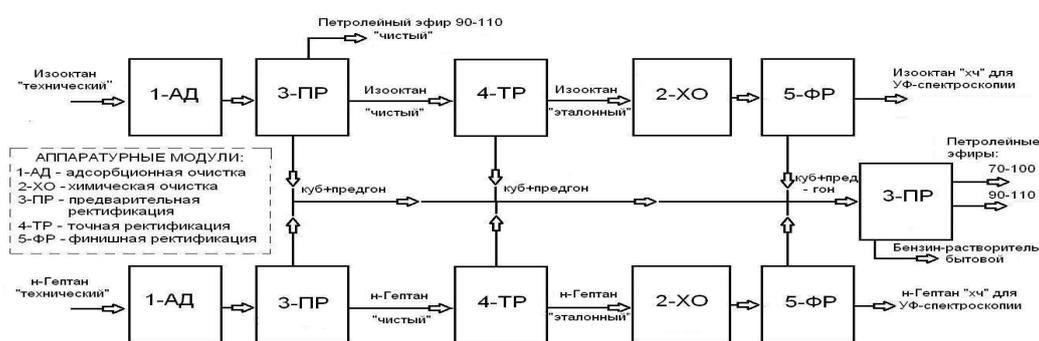
Выпускаемый ассортимент алифатических углеводородов (пентан, гексан, гептан, нонан, изооктан, декан) и петролейных эфиров (40-70, 70-100, 65-75, 90-110), широко применяется в перспективных отраслях науки и техники. Различные направления применения обуславливают разнообразие требований к качеству продуктов, для выполнения которых невозможно ограничиться одним методом очистки [10].

Технологическое производство алифатических углеводородов строится по типовой схеме – от сырья (растворители технических марок) к продуктам более высоких квалификаций («Ч», «ЧДА», «ХЧ»). Конструктивно технологическая схема создается из стандартизованных

аппаратурных модулей, на каждом из которых реализуется процесс очистки от определенной группы примесей и выделение основного продукта.

Созданная гибкая технология базируется на 5 аппаратурных модулях: адсорбции, химической очистки, предварительной, точной и финишной ректификаций. Модули ректификации являются выпускающими и с них производится вывод готовой продукции.

В гибкой модульной схеме (рисунок 6), на примере очистки *n*-гептана и изооктана, показаны связи между модулями (основные, побочные и возвратные технологические потоки). Основным технологическим потоком является последовательный процесс очистки сырья технической квалификации до химического реактива низких квалификаций (*n*-гептан и изооктан «чистый»), затем более высоких (*n*-гептан и изооктан «эталонный»), и до реактивов специальной чистоты (*n*-гептан и изооктан ХЧ для УФ-спектрологии). На побочных потоках путем доочистки и перекалфикации отходов основного технологического цикла получают петролейные эфиры различных марок. Предлагаемая гибкая технология позволяет получать 39 марок алифатических углеводородов (34 реактивной и 5 особой чистоты) и 7 марок петролейных эфиров реактивных квалификаций.



**Рисунок 6** — Модульная технология получения алифатических углеводородов и петролейных эфиров реактивных квалификаций.

Для выпуска ассортимента продукции на созданной гибкой установке (рисунок 6) нами разработаны 6 матриц структуры потоков алифатических углеводородов и 1 матрица структуры потоков для петролейных эфиров. Например, при анализе матрицы структуры потоков для 10 марок изооктана, выпускаемых на АО «ЭКОС-1» показано, что структуры потоков меняются от использования всех 5 модулей (для изооктана ос.ч. «9-5», ос.ч. марки 100, ХЧ для УФС) до 2-х модульной схемы получения изооктана квалификаций «Ч», «ЧДА».

#### 4.2. Разработка гибкого производства неорганических кислот особой чистоты

Качество особо чистых неорганических кислот определяется содержанием в них лимитируемых микропримесей. Нами выбраны процессы, которые исключают возможность внесения дополнительных загрязнений и обеспечивают очистку от основных примесей на уровне  $10^{-6}$ - $10^{-80}$ % масс. Полученная совокупность необходимых процессов очистки позволила создать схему гибкого производства неорганических кислот ОСЧ на основе типовых модулей (рисунок 7). В производство входят семь модулей: химическая очистка, ректификация, адсорбция, абсорбция, десорбция, коррекция состава и фильтрация [8].

Разработана матрица структуры потоков гибкого производства неорганических кислот ОСЧ для 7 видов исходного сырья. Показано, что структура потоков меняется от использования всех 7 модулей (для концентрированных HF и HCl) до 3-х модульной схемы HClO<sub>4</sub> и HNO<sub>3</sub> ОСЧ. В технологической схеме гибкого производства (рисунок 7) предусмотрено 2 варианта реализации модуля ректификации. Фторопластовая установка (рисунок 8) позволяет работать с HCl и HF; установка из кварцевого стекла – со всеми остальными. Основным элементом фторопластового модуля является колонна – царга из фторопласта-4. Царга заполнена насадкой (кольца Рашига). В состав модуля также входят: напорная емкость; кубовая емкость; дефлегматор; выносной кипятильник - тройник в стальной броне с двумя крышками.

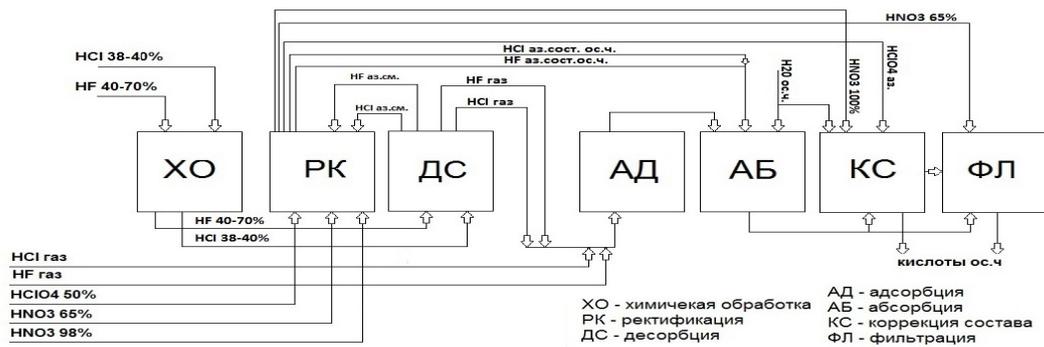


Рисунок 7 — Модульная технология получения высокочистых неорганических кислот.

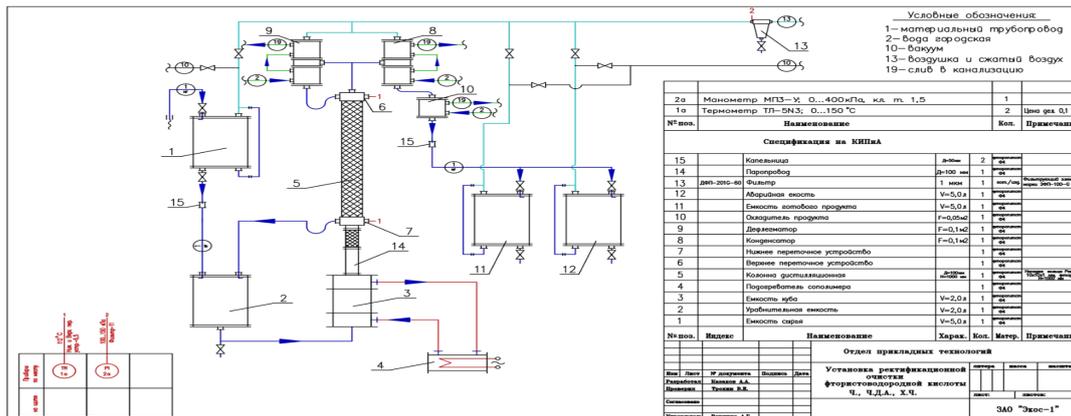


Рисунок 8 — Модуль ректификационной очистки HF.

Ректификационный модуль из кварцевого стекла имеет тот же конструктивный состав. Отличием является отсутствие дефлегматора, так как деление потока осуществляется вентилем – прямое регулирование. Аналогичный модуль для алифатических углеводородов и петролейных эфиров выполнен из нержавеющей стали и допускает эксплуатацию только в периодическом режиме, в то время как в процессе получения кислот ОСЧ этот модуль может работать как в периодическом режиме, так и в полунепрерывном режиме.

#### 4.3. Разработка информационных CALS-проектов в производстве ХР-ОСЧВ

Создание CALS-проектов для гибких производств ХР-ОСЧВ проводилось с помощью программного комплекса PDM STEP Suite (лицензия APL-3451631-01). CALS-стандарт ISO 10303 STEP предлагает способ электронного представления конструкторско-технологической информации. В CALS-стандарт входят прикладные протоколы конкретной структуры информационной модели для разных предметных областей (в т.ч. ХР-ОСЧВ) [9].

Для создания CALS-проектов нами разработаны необходимые справочники «понятий» (СП) и «понятий и объектов» (СПО - объектный). На первом этапе были созданы объектные справочники по типам оборудования, используемого в гибких производствах: реакторы, емкости, колонны и т.д. На рисунке 9 приведен пример СПО по адсорбционным колоннам для получения неорганических кислот особой чистоты. В качестве геометрических характеристик колонны в справочник занесены ее фактическая высота и диаметр. Кроме этого, есть возможность перейти в подкатегорию с чертежом колонны и его спецификацией.

На втором этапе работ созданы понятийные справочники. Например, в СП-справочнике, посвященном капитальному ремонту ректификационных колонн, информация структурирована по основным операциям: пропарка, продувка и чистка; отсоединение коммуникаций; демонтаж и т.д. Особое внимание уделено элементу справочника «способы устранения неисправностей». Анализируя данные, занесенные в справочник, можно выделить основные неисправности, встречающиеся на конкретном производстве, и оптимизировать графики плановых ремонтов и регламентных работ.

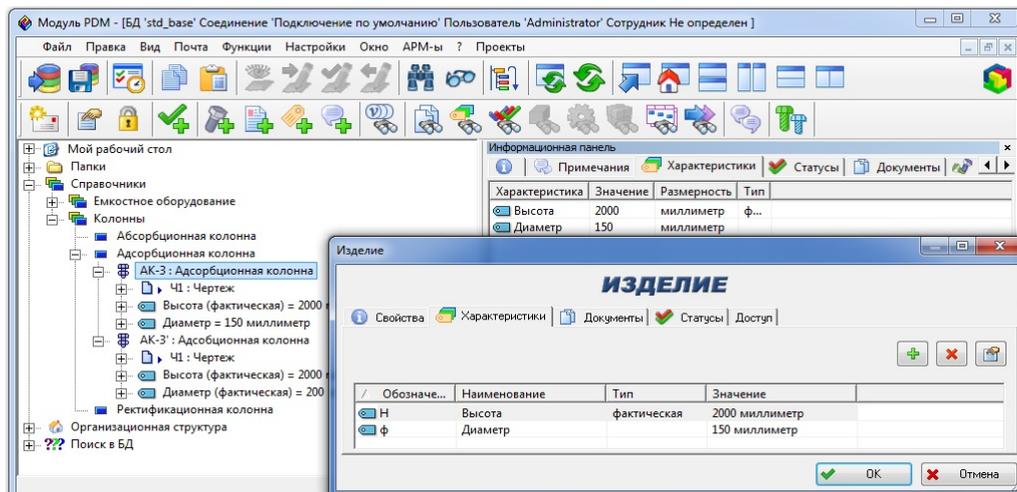


Рисунок 9 — СПО по технологическому оборудованию («адсорбционная колонна»).

Для разработки CALS-проектов модульных производств создана типовая схема (протокол применения) для постоянного технологического регламента. В типовую схему CALS-проекта (рисунок 10) технологического регламента модульного производства алифатических углеводородов реактивных квалификаций занесены 14 основных категорий верхнего уровня [8]. В рассматриваемой подкатегории № 13 (чертеж технологической схемы) приведены информационные блоки по основным модулям: химической и адсорбционной очистки, предварительной, точной и финишной ректификации. Более подробно рассмотрен CALS-проект модуля предварительной ректификации (рисунок 10-а).

В CALS-проекте приведены информационные подкатегории по основным аппаратным элементам (куб, мерник сырья, паропровод, колонна, флорентийский сосуд, холодильник-конденсатор). В схеме CALS-проекта имеются все необходимые технологические подводки: пар-греющий агент, охлаждающая оборотная вода, техническая вода, вакуум, инертный газ-азот, соединенные с атмосферой через фильтр-огнепреградитель.

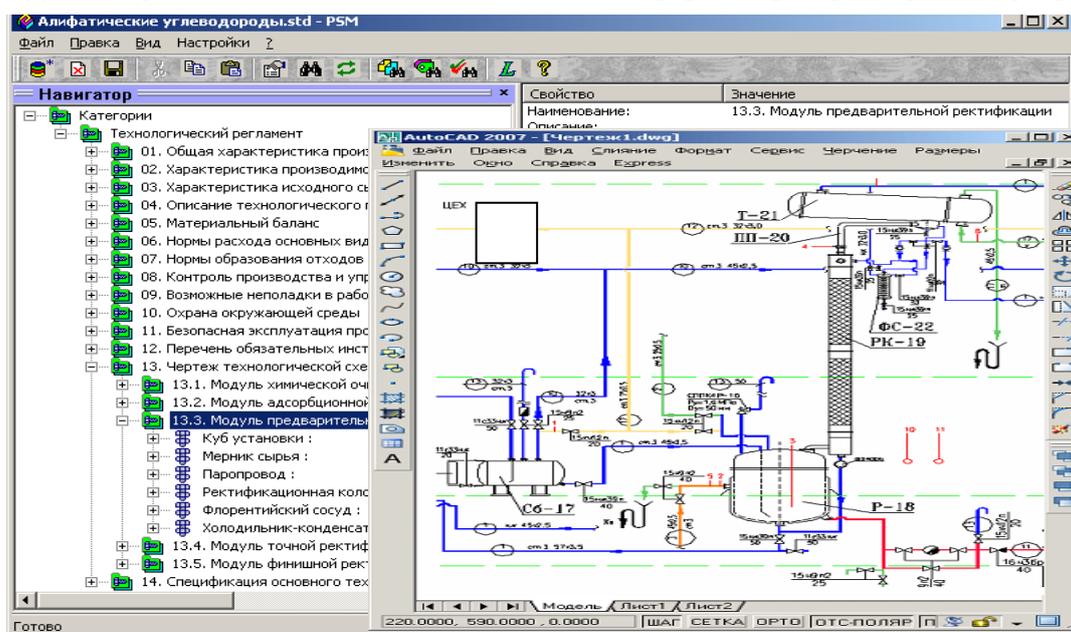


Рисунок 10 — CALS-проект технологического регламента гибкого производства алифатических углеводородов (а - модуль предварительной ректификации).

Для производства неорганических кислот особой чистоты также разработан CALS-проект технологического регламента. В информационные подкатегории занесены все 7 аппаратных модулей (рисунок 7). В подкатегории каждого модуля приведены данные по основным узлам, а также чертеж технологической схемы и чертежи различных элементов модуля. Использование CALS-технологий позволяет не только повысить качество исследовательских и конструкторских работ, но и обеспечить полное компьютерное сопровождение, включающее всю необходимую документацию в электронном виде.

### **5. Автоматизированный аналитический мониторинг ХР-ОСЧВ**

В настоящее время промышленное производство химических реактивов и особо чистых веществ характеризуется существенным ростом требований потребителей к качеству продукции. При этом увеличилось число параметров, определяющих качество продукта, и возросли требования к методам аналитического контроля. Для решения этих проблем необходимо применение современных автоматизированных систем компьютерного менеджмента качества (КМК-системы) [11].

КМК-система (так же, как и LIMS - Laboratory Information Management System) предназначена для автоматизации управления, обработки и хранения информации о работе аналитической лаборатории. Она позволяет: улучшить аналитический контроль качества продукции; повысить эффективность использования ресурсов лаборатории (персонала, приборов, и реагентов); сократить время выполнения аналитических исследований.

#### **5.1. Разработка систем компьютерного менеджмента качества.**

На примере научно-производственного комплекса (Научный центр «Малотоннажная химия», завод АО «ЭКОС-1») предложены основные цели и задачи аналитического мониторинга в предметной области «ХР-ОСЧВ». Разработана методология управления промышленным производством ХР-ОСЧВ по результатам мониторинга исходного сырья и полупродуктов. Разработаны математические модели для расчета основных режимных характеристик ректификационной очистки (флегмовое число, процент предгона от объема загрузки) в зависимости от концентрации лимитирующей примеси в исходном сырье.

В рамках типового CALS-проекта «Технические условия» разработаны архитектура, алгоритмическое и программное обеспечение автоматизированной КМК-системы ХР-ОСЧВ в следующих информационных сечениях: анализируемое вещество; показатели качества; методы анализа; аналитическое оборудование. Показатели качества структурированы по 4-м кластерам: основное вещество, катионы металлов, анионы, взвешенные частицы.

Разработана автоматизированная база данных по методам анализа и аналитическому оборудованию, используемому в технологии получения ХР-ОСЧВ. Информация по каждому прибору включает описание важнейших узлов и характеристик, необходимых пользователю для выбора аналитического оборудования. Проанализированы программные и технические средства автоматизированных систем управления аналитическими приборами.

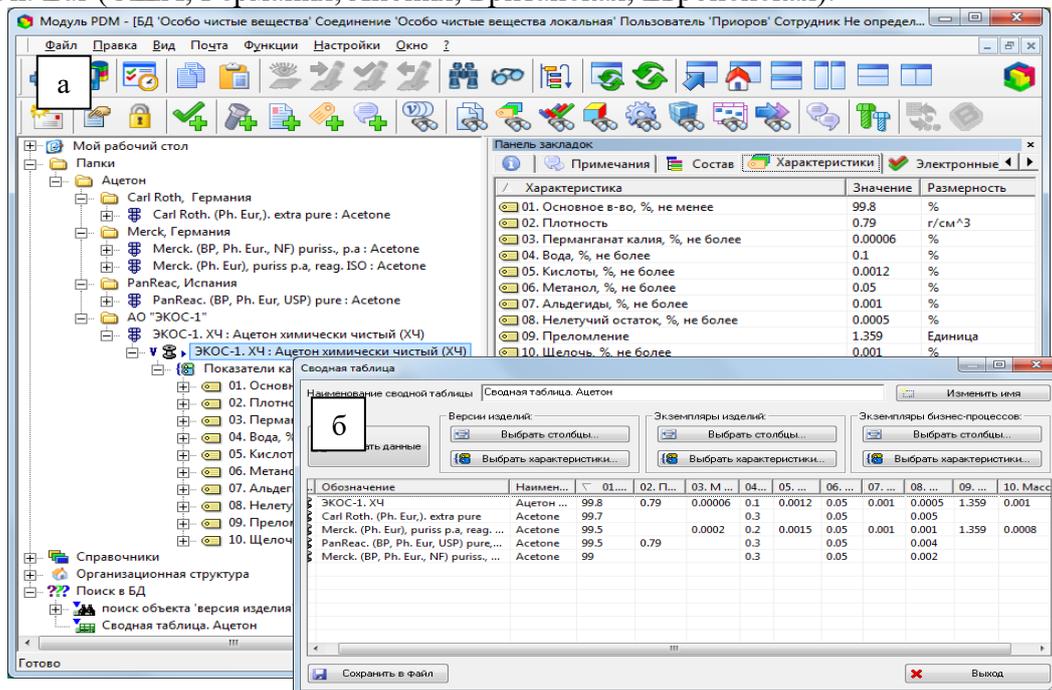
Разработаны автоматизированные КМК-системы неорганических кислот (32 марки) и органических растворителей (297 марок) реактивной и особой чистоты с использованием современных методов анализа и аналитического оборудования. Проанализирована взаимосвязь показателей качества с соответствующими областями применения. В качестве примера рассмотрим комплекс работ для фармацевтики.

#### **5.2. Импортозамещение ХР-ОСЧВ для фармацевтической промышленности**

В фармацевтической промышленности нашли широкое применение ХР-ОСЧВ [12]. Количество выпускаемых «ЭКОС-1» реактивов связано с ростом требований фармацевтики к качеству продукции. Для решения этой проблемы создана соответствующая КМК-система.

На первом этапе компьютерного менеджмента качества разработана база данных по 11 ведущим зарубежным фирмам, выпускающим фармацевтическую продукцию: Bayer AG; Abcam; Acros Organics BVBA; Applichem; Bio-Rad Laboratories, Inc.; Mallinckrodt Baker, Inc.; MP Biomedicals; Thermo Fisher Scientific; PanReac; Merck; Carl Roth GmbH+Co.KG. На основе компьютерного анализа и экспертных оценок были выбраны 3 наиболее перспективные

фирмы (PanReac; Merck; Carl Roth). При анализе рассматриваются 5 фармакопей: USP, DAB, JP, BP, Ph. Eur (США, Германия, Япония, Британская, Европейская).



**Рисунок 11** — КМК-система фармакопейного ассортимента «ЭКОС-1». Импортозамещение продукции PanReac, Merck, Carl Roth (а - архитектура системы; б - сводная таблица).

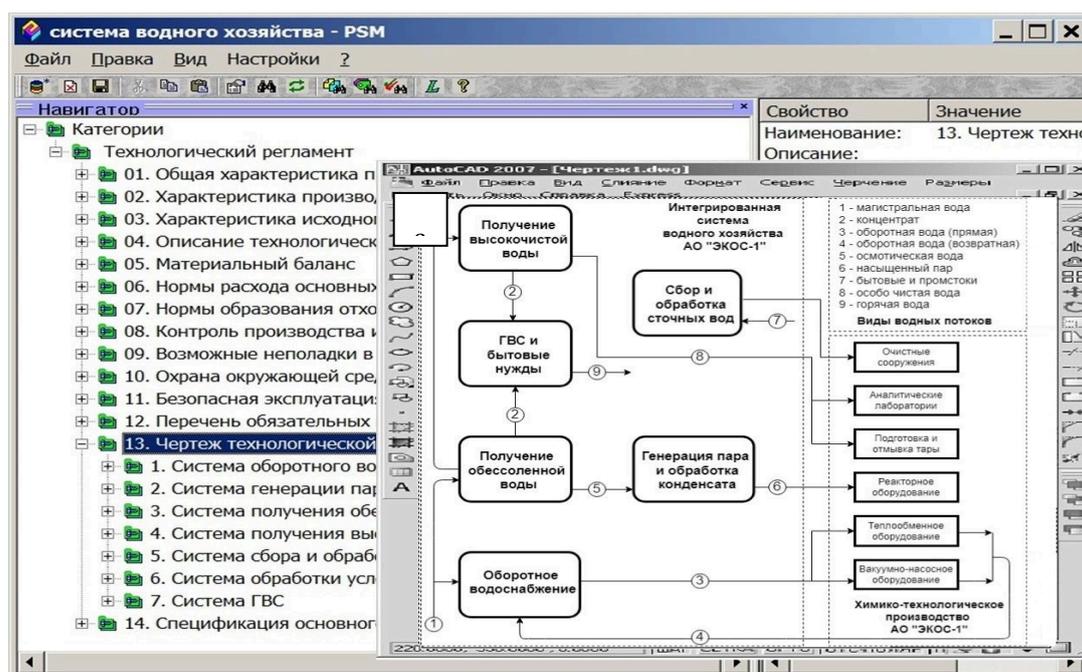
В разработанной КМК-системе (рисунок 11) рассмотрены 3 группы продукции АО «ЭКОС-1»: органические растворители, неорганические кислоты, заказные реактивы. В приведенном примере фармакопейного ацетона рассматривается максимальная группа характеристик, включающая в себя 10 основных показателей качества (рисунок 11-а).

В результате компьютерного мониторинга ассортимента АО «ЭКОС-1» показана перспективность замещения отечественной продукцией реактивов ведущих зарубежных фирм (рисунок 11-б). Также перспективно дальнейшее развитие КМК-системы с алгоритмами экспертного анализа по доработке технологического процесса (в случае отставания отечественных показателей) [12]. В случае совпадения или превышения наших показателей качества предлагается возможность (рекомендация) замены импортного аналога, без коррекции технологии и научно-технической документации.

Результаты, полученные с помощью автоматизированных КМК-систем, вошли в отчетную документацию по контрактам Евразийской экономической комиссии, Минобрнауки и Минпромторга России, Госкорпорации «Роскосмос» и проект РФФИ № 16-07-00823 «Теоретические основы разработки и внедрения автоматизированных CALS-систем управления жизненным циклом научных исследований в химической промышленности».

## 6. Интегрированная система водного хозяйства для производства ХР-ОСЧВ

Экологическому направлению наших работ соответствует разработанная для АО «ЭКОС-1» интегрированная система водного хозяйства предприятия. В структуру системы входят 6 локальных подсистем оборотного водоснабжения; генерации пара, сбора и обработки конденсата; получения обессоленной воды; получения высокоочищенной воды; сбора и очистки загрязненных вод; горячего водоснабжения (рисунок 12).



**Рисунок 12** — CALS-проект технологического регламента интегрированной системы водного хозяйства (а – блок-схема системы).

Анализируются 9 видов водных потоков: магистральная вода, концентрат, обратная вода (прямая), обратная вода (возвратная), осмотическая вода, насыщенный пар, бытовые и промстоки, особо чистая вода, горячая вода. На рисунке 12 приведена типовая схема CALS-проекта технологического регламента интегрированной системы водного хозяйства АО «ЭКОС-1». Созданная типовая система характеризуется: уменьшением потери воды, промышленных и условно-жестких стоков, а также негативного воздействия предприятия на окружающую среду; повышением эффективности и безопасности производства. Работа проводилась при поддержке РФФИ по проекту № 20-03-00515 «Системные исследования жизненного цикла разработки и производства в технологии материалов особой чистоты».

### Выводы

Проведен структурный анализ целей и задач координирующего органа для эффективного управления производством ХР-ОСЧВ в России. Показано, что одним из перспективных направлений обеспечения экономики ХР-ОСЧВ является более тесное объединение науки и производства. Рассмотрена совместная работа промышленного предприятия АО «ЭКОС-1» и Научного центра «Малотоннажная химия». Проведен анализ основных структур управления для рассматриваемого научно-промышленного комплекса малотоннажной химии и приведены примеры их применения. Разработаны 3D-модели для складского хозяйства АО «ЭКОС-1» и аналитической лаборатории Научного центра.

Созданы теоретические основы синтеза гибких модульных производств ХР-ОСЧВ. На их основе синтезированы гибкие технологии широкого ассортимента алифатических углеводородов реактивной квалификации и неорганических кислот особой чистоты. Разработка и выдача проектной документации проводилась на основе системы компьютерной поддержки – CALS-технология.

Разработана автоматизированная база данных по методам анализа и аналитическому оборудованию, используемому в технологии получения ХР-ОСЧВ. Информация по каждому прибору включает описание важнейших узлов и характеристик, необходимых пользователю (химику-аналитику) для выбора аналитического оборудования. Для аналитического мониторинга ХР-ОСЧВ разработаны системы компьютерного менеджмента качества для ассортимента органических растворителей (297 марок) и неорганических кислот (32 марки).

Для АО «ЭКОС-1» разработана интегрированная система водного хозяйства предприятия. В структуру системы входят 6 локальных подсистем оборотного водоснабжения; генерации пара, сбора и обработки конденсата; получения обессоленной воды; получения высокочистой воды; сбора и очистки загрязненных вод; горячего водоснабжения. Разработка системы и модулей проведена на основе CALS-технологий.

Автор благодарен за содействие и поддержку к.э.н. Клевцову Александру Алексеевичу (директор АО «ЭКОС-1») и к.х.н. Трохину Василию Евгеньевичу (директор АО Научный центр «Малотоннажная химия»).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бессарабов А.М., Дорохов И.Н., Кафаров В.В. Системный анализ при синтезе оптимальных производств высокочистых твердофазных веществ на примере оксидных материалов // Теоретические основы химической технологии. 1989. Т.23. №3. С.421-424.
2. 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.
3. Клевцов А.А., Трохин В.Е., Бессарабов А.М., Стоянов О.В. Разработка стратегии координирующего органа для эффективного управления производством продукции малотоннажной химии в РФ // Вестник технологического ун-та. 2019. Т. 22. №11. С. 141-145.
4. 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.
5. Rasheed A., Kvamsdal T., San O. Digital twin: Values, challenges and enablers from a modeling perspective // IEEE Access. 2020. V. 8. P. 21980-22012.
6. 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.
7. Бессарабов А.М., Трохин В.Е., Трынкина Л.В., Прорехина Ю.М. Разработка цифрового двойника лаборатории аналитического контроля особо чистых веществ // Математические методы в технике и технологиях. 2023. № 2. С. 83-86.
8. Kazakov A.A., Bessarabov A.M., Trokhin V.E., Vendilo A.G. Development of equipment modules for flexible technology of high-purity inorganic acids // Chemical and Petroleum Engineering. 2015. V. 51. No. 9. P. 597-603.
9. 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.
10. Trokhin V.E., Vendilo A.G., Bessarabov A.M., Kazakov A.A., Stepanova T.I. Use of the CALS concept for development of equipment modules producing reagent-quality aliphatic hydrocarbons // Chemical and Petroleum Engineering. 2012. V. 48. No, 5-6. P. 271-277.
11. 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.
12. 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. Упр-ие, контроль, диагностика. 2022. № 8. С. 19-26.
13. 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.

**ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ СПОСОБЫ И АППАРАТЫ НА ОСНОВЕ ВИХРЕВЫХ ПОТОКОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ ПЫЛЕГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ПИЩЕВОЙ И ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**  
**HIGHLY EFFECTIVE METHODS AND DEVICES BASED ON VORTEX FLOW FOR CLEANING DUST AND GAS EMISSIONS AT FOOD AND CHEMICAL INDUSTRY ENTERPRISES**

**Александр Васильевич Акулич**  
**Alexander Vasilyevich Akulich**

*Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий,  
Республика Беларусь, Могилев*  
*Belarusian State University of Food and Chemical Technologies,  
Republic of Belarus, Mogilev*  
*(e-mail: akulichav@bgut.by)*

*Аннотация:* Предложена новая классификация закрученных потоков и центробежных пылеуловителей. Приведены результаты теоретических исследований движения двух закрученных потоков газовой фазы в прямоточных вихревых аппаратах. Разработаны высокоэффективные способы и аппараты с управляемой гидродинамикой для пылеочистки на основе взаимодействующих вихревых потоков. Представлены результаты исследований гидравлического сопротивления и эффективности улавливания разработанных вихревых пылеуловителей различных типов и их внедрение в промышленности.

*Abstract:* A new classification of swirling flows and centrifugal dust collectors has been proposed. The gas phase two swirling flows motion in direct-flow vortex devices theoretical studies results have been presented. Highly efficient methods and devices with controlled hydrodynamics for dust cleaning based on interacting vortex flows have been developed. The results of studies of the hydraulic resistance and collection efficiency of various types developed vortex dust collectors and their implementation in industry have been presented.

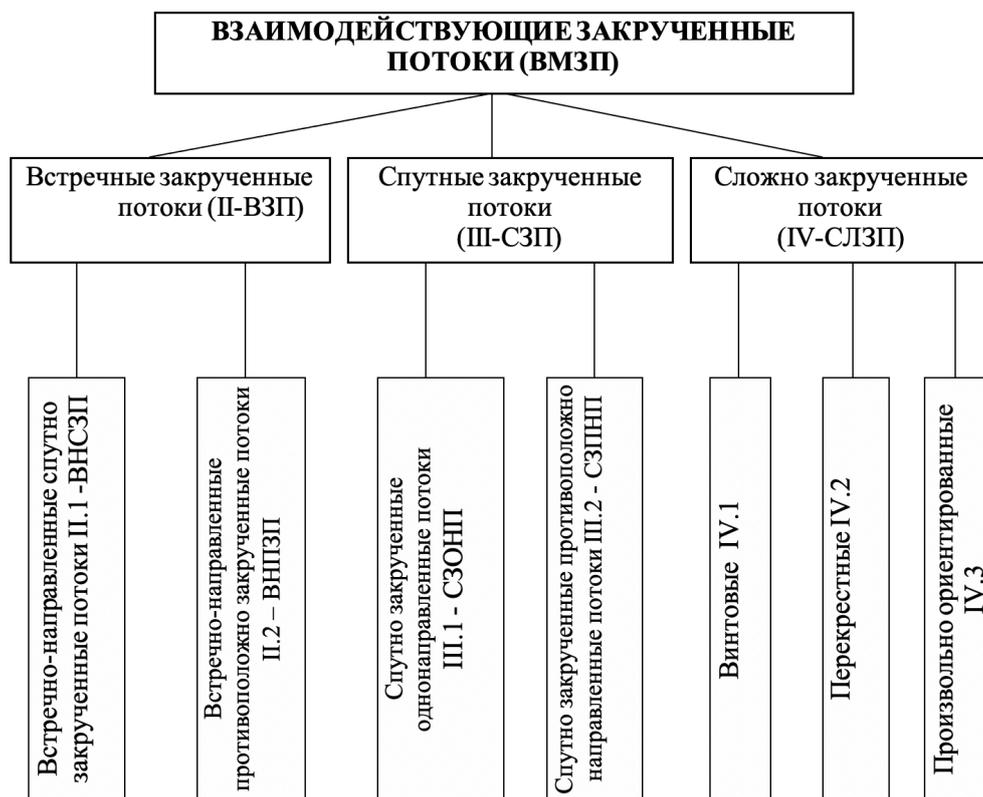
*Ключевые слова:* закрученные потоки, взаимодействующие вихревые потоки, гидродинамика, способы пылеочистки, вихревые пылеуловители, групповые и комбинированные пылеуловители, гидравлическое сопротивление, эффективность улавливания, кратность расходов.

*Key words:* swirling flows, interacting vortex flows, hydrodynamics, dust cleaning methods, vortex dust collectors, group and combined dust collectors, hydraulic resistance, collection efficiency, flow rate.

Развитие современного промышленного производства требует разработки и внедрение эффективных энерго- и ресурсосберегающих технологий и оборудования, а также решение экологических проблем. В этой связи создание высокоэффективных аппаратов для очистки пылегазовых выбросов на предприятиях пищевой, химической и других отраслей промышленности является важной и актуальной задачей.

Исследования показывают, что перспективным направлением в области пылеочистки является применение взаимодействующих вихревых потоков [1-6].

Автором предложена новая классификации закрученных потоков на основе способов генерации движения и взаимодействия их между собой [4, 6]. Закрученные потоки разделены на четыре класса: I – одиночные закрученные потоки (ОЗП); II – встречные закрученные потоки (ВЗП); III – спутные закрученные потоки (СЗП); IV – сложно закрученные потоки (СЛЗП) (рисунок 1). Каждый класс включает подклассы [6].



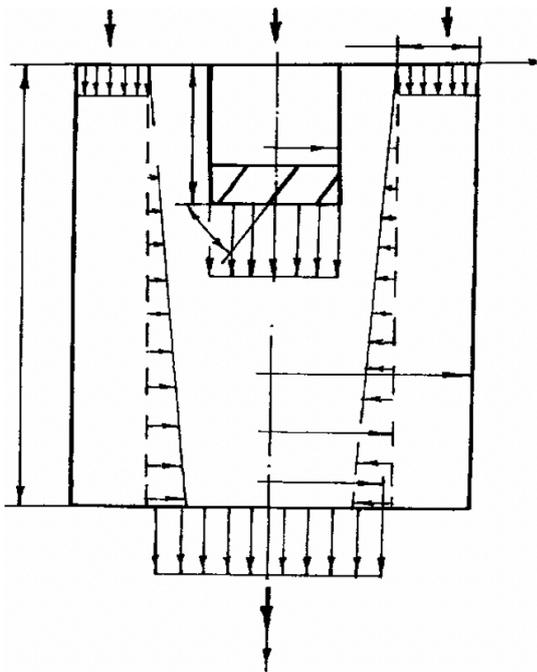
**Рисунок 1** — Классификация взаимодействующих закрученных потоков

Взаимодействующие закрученные потоки генерируются вокруг одной общей оси, двух и более параллельных осей, а также вокруг перпендикулярных осей. При этом взаимодействие между потоками происходит, как в одной плоскости, так и в разных плоскостях в условиях автономной, попеременной, непрерывной и пульсирующей их подачи. Могут реализовываться режимы однократного или многократного взаимодействия потоков с рециклом или без рецикла.

По способам формирования и движения, взаимодействующие закрученные потоки подразделяются на «поток внутри потока», «поток навстречу потоку» и «поток за потоком» [6]. На практике возможны варианты комбинирования, т. е. сочетания различных классов, подклассов и видов закрученных потоков между собой, а также воздействия других энергетических полей.

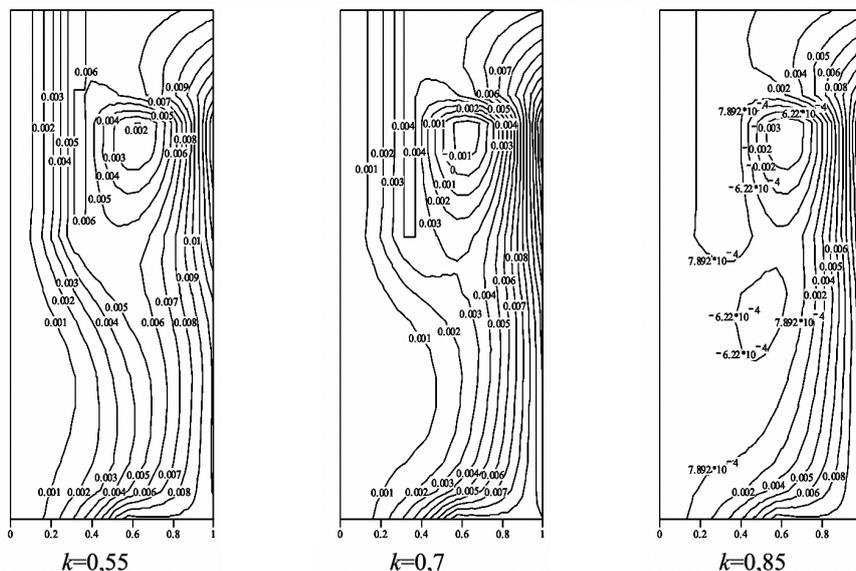
При взаимодействии двух вихревых потоков в зависимости от условий их формирования и соотношения создаются различные гидродинамические режимы, что позволяет управлять гидродинамикой в аппаратах, обеспечивая высокоэффективную очистку газов от мелкодисперсных твердых частиц.

Разработана математическая модель движения двух периферийного и центрального спутно закрученных потоков газовой фазы (рисунок 2) [7-9]. Газовые потоки закручены вокруг вертикальной оси и движутся «поток внутри потока». Принято, что центральный газовый поток, закрученный с помощью лопаточного завихрителя подчиняется закону квазитвердого вращения. Распределение тангенциальной скорости газа во входном патрубке периферийного потока равномерное. Принято, что пристеночная турбулентность является равновесной.



**Рисунок 2** — Схема движения двух периферийного и центрального спутно закрученных потоков

Получено численное решение системы дифференциальных уравнений Навье-Стокса и неразрывности с помощью  $(k_t-\varepsilon)$  - модели турбулентности [8]. Изучена гидродинамика движения двух периферийного и центрального спутно закрученных потоков газовой фазы в прямооточных вихревых пылеуловителях в зависимости от кратности расходов  $k$ , определяемая как отношение объемного расхода газа периферийного потока к общему объемному расходу газа. Анализ полученных результатов показывает, что с изменением  $k$  изменяется гидродинамическая обстановка в аппаратах. Так, при  $k=0,55$  в зоне взаимодействия вихревых потоков наблюдается примерно равная интенсивность течения газа (рисунок 3), вследствие увеличения доли газа, подаваемого в центральный завихритель. Однако, при  $k=0,85$  возрастает интенсивность течения газа в периферийной области и снижается в центральной части, вблизи завихрителя, где появляется зона кольцевого течения газа (т.е. зона вихреобразования). При  $k=0,7$  такой зоны не наблюдается (рисунок 3) [8-9].



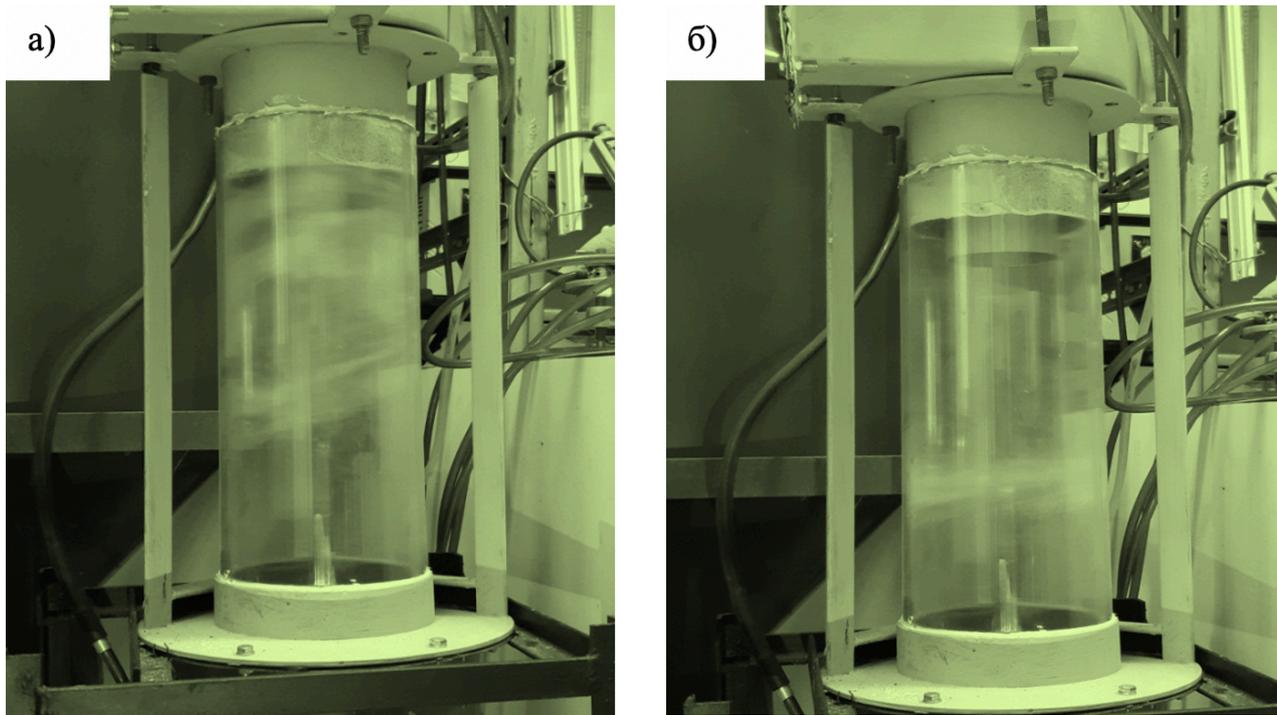
**Рисунок 3** — Изолинии тока газа в прямооточном вихревом пылеуловителе при различной кратности расходов  $k$  ( $v_{cp}=5$  м/с;  $\beta=45^\circ$ ;  $h_2/H_k=0,45$ )

Для подтверждения результатов математического моделирования движения двух закрученных потоков газовой фазы в части существования различных гидродинамических режимов при изменении кратности расходов проведены экспериментальные исследования.

В рамках исследования гидродинамики аппаратов для очистки газов от мелкодисперсных частиц создан лабораторный образец вихревого пылеуловителя с прозрачным цилиндрическим корпусом для визуализации протекающих процессов в сепарационной зоне при движении и взаимодействии двух закрученных запыленных потоков (рисунок 4) [10]. Цилиндрический корпус вихревого пылеуловителя выполнен стеклянным

внутренним диаметром 0,14 м и высотой сепарационной камеры 0,55 м. Для экспериментальных исследований принят интервал общего объемного расхода газа  $Q_0=0,0833\div 0,1$  м<sup>3</sup>/с, кратности расходов  $k=0\div 1$ , концентрации мелкодисперсных частиц (запыленность газа) в газовых потоках  $z=7,5\div 37,5$  г/м<sup>3</sup>. В качестве дисперсного материала использованы пшеничная мука и комбикормовая пыль.

С помощью фотосъемки зафиксирована структура взаимодействующих газодисперсных потоков в лабораторном образце вихревого пылеуловителя и впервые установлено образование “вращающегося кольца” дисперсного материала в сепарационной камере (рисунок 4). Экспериментально установлено, что структура, высота формирования и величина “вращающегося кольца” дисперсного материала зависит от изменения кратности расходов в интервале  $k=0\div 0,5$ .



а –  $k=0,21$ ; б –  $k=0,47$

**Рисунок 4** — Визуализация формирования вихря и “вращающегося кольца” дисперсного материала в сепарационной камере вихревого пылеуловителя при общем объемном расходе газа  $Q_0=0,0917$  м<sup>3</sup>/с и концентрации твердой фазы  $z=15$  г/м<sup>3</sup>

Разработан метод управления взаимодействующими вихревыми потоками в аппаратах для очистки газов от мелкодисперсных частиц, основанный на регулировании кратности расходов путем установки на подводящем воздуховоде вместе его разветвления на периферийный и центральный пылегазовые потоки поворотной заслонки, позволяющей изменять распределение общего объемного расхода запыленного газа [10]. Это позволяет установить такой гидродинамический режим взаимодействия вихревых потоков, при котором обеспечивается высокая эффективность улавливания мелкодисперсных частиц при наименьшем гидравлическом сопротивлении.

Кроме того данный метод управления позволяет расширить область применения вихревых аппаратов данного типа и рассматривать их как многофункциональные, т.е. появляется возможность их эффективного использования для реализации как гидромеханических, так и тепло- и массообменных процессов.

Установлено, что при изменении кратности расходов в интервале  $k=0\div 1$  при постоянном общем объемном расходе газа в сепарационной камере лабораторного образца вихревого пылеуловителя обеспечивается формирование различной структуры

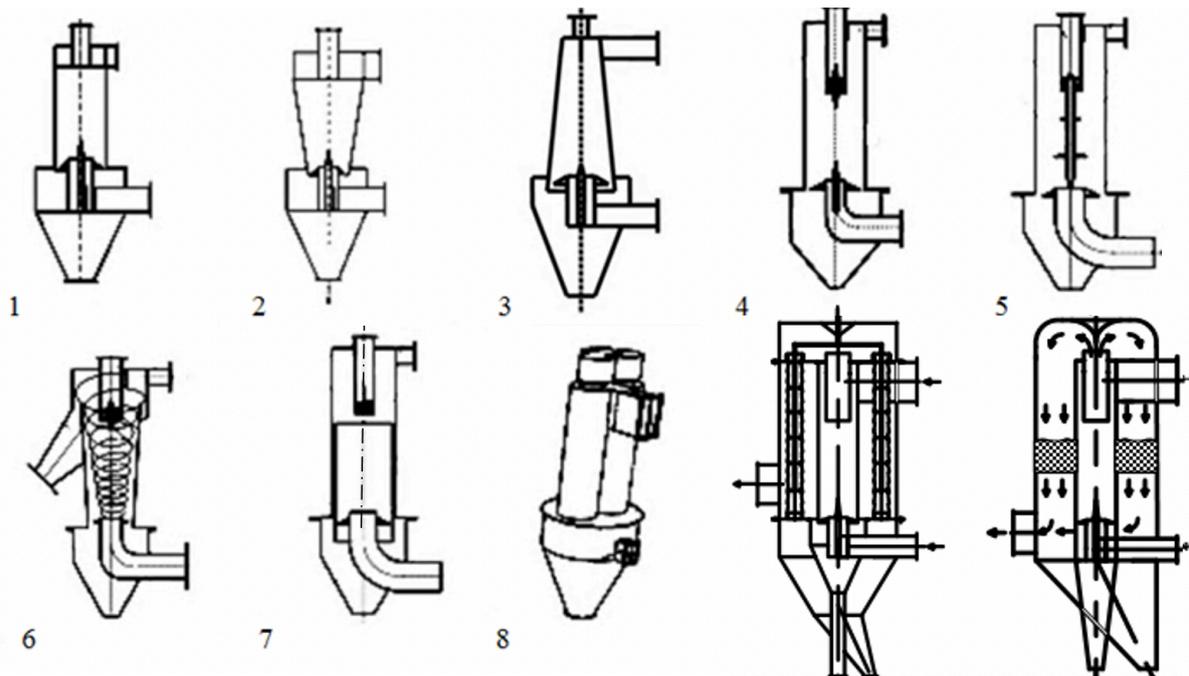
взаимодействия вихревых потоков. Так в интервале  $k=0\div 0,5$  реализуется гидродинамический режим “вращающегося кольца”, удерживающего мелкодисперсный материал. Наиболее сформированное “вращающееся кольцо” наблюдается в интервале  $k=0,35\div 0,5$  [10]. Гидравлическое сопротивление при этом наименьшее, а эффективность улавливания – невысокая. При  $k=0,6\div 0,8$  достигается наибольшая эффективность улавливания мелкодисперсных частиц комбикормовой пыли в лабораторном образце вихревого пылеуловителя.

Предложена классификация центробежных пылеуловителей, которые разделены на три класса: циклонные, вихревые и комбинированные. Вихревые пылеуловители включают два подкласса: противоточные и прямоточные. Выделен новый класс комбинированных пылеуловителей, к которым отнесены вихревые-фильтрационные аппараты, а также вихревые пылеуловители, в которых одновременно действуют другие энергетические поля [11].

В Белорусском государственном университете пищевых и химических технологий под руководством автора на протяжении более 30 лет выполняются исследования по созданию новых способов и конструкций пылеуловителей на основе взаимодействующих вихревых потоков, которые существенно расширяют область их применения и повышают эффективность очистки газовых потоков от мелкодисперсных твердых частиц. На рисунке 5 представлены схемы разработанных пылеуловителей на основе взаимодействующих вихревых потоков [3].

Разработан способ и новые конструкции вихревых противоточных пылеуловителей (ВПП) (поз. 1-3, рисунок 5) [3, 12]. В данных пылеуловителях запыленный газ подается через два тангенциальных ввода, расположенных в верхней и нижней частях аппарата, при этом спутно закрученные потоки движутся навстречу друг другу и в результате их взаимодействия обеспечивается высокоэффективный гидродинамический режим в сепарационной зоне. Очищенный газ выводится через выхлопную трубу в верхней части аппарата. Данные конструкции пылеуловителей обеспечивают высокую эффективность улавливания мелкодисперсных частиц и могут применяться в различных производствах с учетом свойств улавливаемых материалов. Так, выполнение корпуса цилиндро-коническим сужающимся книзу обеспечивает увеличение эффективности улавливания наиболее мелкой фракции (поз. 2, рисунок 5). Для улавливания частиц материала, отличающихся высокой абразивностью, предложена конструкция с расширяющимся книзу корпусом (поз. 3, рисунок 5).

Разработан новый способ пылеочистки газов, основанный на прямоточном нисходящем движении двух закрученных в одном направлении запыленных газовых потоков взаимодействующих между собой и созданы новые конструкции прямоточных вихревых пылеуловителей (ПВП) (поз. 4-7, рисунок 5) [3, 13-14]. Газовзвесь подается через периферийный и центральный вводы, расположенные в верхней части прямоточного пылеуловителя и пылегазовые потоки, закручиваясь взаимодействуют между собой и движутся в одном направлении. В результате прямоточного движения и взаимодействия очищенный газ выводится через выхлопную трубу в нижней части аппарата (поз. 4-7, рисунок 5). Такой характер движения газодисперсных потоков позволяет снизить гидравлическое сопротивление пылеуловителей. Для уменьшения зон разряжения и стабилизации гидродинамической структуры взаимодействующих потоков по вертикальной оси в прямоточных вихревых пылеуловителях установлены дополнительные шайбы (поз. 5, рисунок 5), корпус выполнен коническим и оснащен промежуточным бункером (поз. 6, рисунок 5), в зоне сепарации установлена цилиндрическая обечайка (поз. 7, рисунок 5).



- 1 – вихревой противоточный пылеуловитель; 2 – вихревой спирально–конический пылеуловитель; 3 – вихревой пылеуловитель с расширяющимся корпусом; 4 – прямоточный вихревой пылеуловитель; 5 – прямоточный вихревой пылеуловитель с дополнительными шайбами; 6 – прямоточный вихревой пылеуловитель с коническим корпусом и промежуточным бункером; 7 – прямоточный вихревой пылеуловитель с цилиндрической обечайкой; 8 – групповой вихревой противоточный пылеуловитель; 9 – комбинированный пылеуловитель с тканевыми фильтровальными рукавами; 10 – комбинированный пылеуловитель с зернистым слоем

**Рисунок 5** — Схемы разработанных пылеуловителей на основе взаимодействующих вихревых потоков

Созданы экспериментальные образцы противоточного (ВПП–140) и прямоточного (ПВП–140) вихревых пылеуловителей с диаметрами сепарационных камер 0,14 м. Проведены исследования их гидравлического сопротивления и эффективности улавливания дисперсных материалов при общем объемном расходе газа  $Q_0=0,0778$  м<sup>3</sup>/с. Установлено, что при кратности расходов  $k=0,6$  гидравлическое сопротивление ПВП–140 составляет 1000 Па, а ВПП–140 – 1250 Па [3], при этом эффективность улавливания сухого обезжиренного молока с медианным диаметром  $d_{50}=19,2$  мкм в ПВП–140 достигает  $\eta=91\%$ , а при улавливании сахарной пудры с  $d_{50}=16,7$  мкм в ВПП–140  $\eta=72\%$ .

Дан сравнительный анализ вихревых пылеуловителей различного типа и определено, что при одинаковых режимах работы прямоточный вихревой пылеуловитель (ПВП) характеризуется меньшим гидравлическим сопротивлением, чем вихревой противоточный пылеуловитель (ВПП), обеспечивая при этом достаточно высокую эффективность улавливания дисперсных материалов.

Для очистки больших объемов запыленного газа разработаны новые способы, которые реализованы в групповых вихревых пылеуловителях на основе взаимодействующих закрученных потоков (поз. 8, рисунок 5) [9, 15–18]. Они отличаются тем, что гидродинамическое взаимодействие периферийных и центральных потоков газозвеси происходит в корпусе, образованном из двух цилиндрических обечайек, установленных без зазора на общем бункере уловленного материала. При этом периферийные потоки газозвеси подаются в верхней части обечайек, а центральные потоки газозвеси подаются в нижней в противоточных аппаратах и в верхней части в прямоточных. При этом очищенный газ

отводится в верхней части корпуса в противоточных аппаратах (поз. 8, рисунок 5) и в нижней части в прямоточных.

На основе энергетического баланса потоков впервые получена зависимость для расчета гидравлического сопротивления групповых противоточных вихревых пылеуловителей [3]:

$$\Delta P = \frac{1}{2} [(\Delta P'_1 + \Delta P''_1) \cdot k + (\Delta P'_2 + \Delta P''_2) \cdot (1 - k)], \quad (1)$$

где  $\Delta P'_1, \Delta P''_1, \Delta P'_2, \Delta P''_2$  – потери полного давления, соответственно, периферийных и центральных потоков запыленного газа в каждой из цилиндрических обечаек, Па;

$k = Q_1/Q_0$  – кратность расходов;

$Q_1, Q_2$  – объемные расходы запыленного газа, подаваемого через периферийные и центральные патрубки, м<sup>3</sup>/с;

$Q_0 = Q_1 + Q_2$  – общий объемный расход запыленного газа, м<sup>3</sup>/с.

Проведен комплекс экспериментов по исследованию гидравлического сопротивления и эффективности улавливания группового вихревого противоточного пылеуловителя ГВП-120-2 от кратности расходов  $k$  при различных общих объемных расходах газа. Установлено, что при  $k=0,55 \div 0,70$  его гидравлическое сопротивление составляет от 460 до 1250 Па. При этом эффективность улавливания перлово-овсяной пыли при данной кратности расходов достигает 98 %, а овсяной пыли – 85 % [9].

Разработан новый энергоэффективный способ очистки газов от мелкодисперсных твердых частиц, реализуемый в групповом прямоточном вихревом пылеуловителе на основе взаимодействующих закрученных потоков [3]. Проведены экспериментальные исследования гидравлического сопротивления и эффективности улавливания группового прямоточного вихревого пылеуловителя от кратности расходов  $k$  и отношения диаметра центральных завихрителей к диаметру камер центробежного улавливания  $d/D$  при отношении высоты установки центральных завихрителей к высоте цилиндрических камер центробежного улавливания  $h/H = 0,25$  и общем объемном расходе газа  $Q_0=0,138$  м<sup>3</sup>/с.

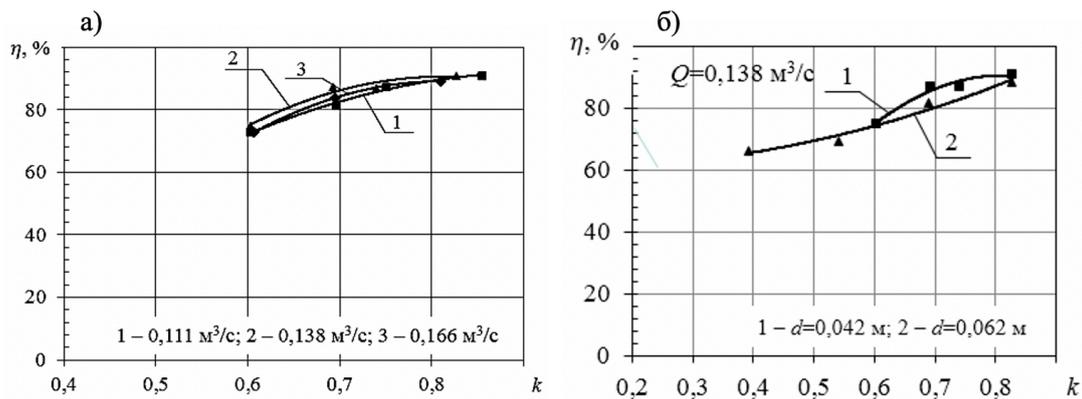
Установлено, что гидравлическое сопротивление группового прямоточного пылеуловителя с взаимодействующими закрученными потоками возрастает с увеличением кратности расходов  $k$  и снижается при увеличении  $d/D$ . Наименьшее гидравлическое сопротивление  $\Delta P=400 \div 600$  Па достигается при  $d/D=0,46$  ( $d=0,056$  м),  $k=0,6 \div 0,8$  при  $h/H = 0,25$  ( $h=0,12$  м) и общем объемном расходе газа  $Q_0=0,138$  м<sup>3</sup>/с [3].

Установлено, что на эффективность улавливания группового прямоточного вихревого пылеуловителя значительное влияние оказывает кратность расходов  $k$ . Из анализа зависимостей, представленных на рисунке 6а, установлено, что при  $k=0,85$ ,  $d=0,042$  м и  $h=0,12$  м во всем интервале исследованного объемного расхода газа  $Q_0=0,111 \div 0,166$  м<sup>3</sup>/с эффективность улавливания соляной пыли в групповом прямоточном вихревом пылеуловителе достигает 90%. Определено, что при уменьшении кратности расходов до  $k=0,7$  эффективность улавливания снижается до  $\eta=74$  %. Кроме того, установлено, что уменьшение диаметров центральных завихрителей обеспечивает повышение эффективности улавливания соляной пыли в групповом прямоточном вихревом пылеуловителе (рисунок 6б). Так, при  $k=0,7$  и  $Q_0=0,138$  м<sup>3</sup>/с для  $d=0,042$  м  $\eta=88\%$ , а для  $d=0,062$  м  $\eta=80$  % [3].

Полученные зависимости эффективности улавливания группового прямоточного вихревого пылеуловителя от кратности расходов позволяют сделать вывод об управляемой гидродинамике разработанного группового аппарата, то есть регулируя режимы работы пылеуловителя, подбираются оптимальные значения режимных и конструктивных параметров, при которых обеспечивается высокая эффективность улавливания мелкодисперсных пылей при наименьшем гидравлическом сопротивлении.

Разработан новый способ и конструкция комбинированного пылеуловителя, в которой улавливание взвешенных частиц происходит в центробежном поле в системе двух взаимодействующих вихревых потоков, закрученных в одном направлении и движущихся навстречу друг другу с последующей доочисткой газа фильтрованием (поз. 9, рисунок 5) [19–20]. Создан экспериментальный образец комбинированного пылеуловителя КП–150–1,36 с

камерой центробежного отделения диаметром 0,15 м и фильтровальной перегородкой площадью 1,36 м<sup>2</sup>. Диаметр корпуса составляет 0,45 м, высота 1,4 м.



**Рисунок 6** — Зависимости эффективности улавливания соляной пыли в групповом прямоточном вихревом пылеуловителе

Проведено математическое планирование эксперимента по плану Бокса–Уилсона 2<sup>3</sup>+ звезда с двумя опытами в центре плана и величиной звездного плеча  $\alpha=1,284$  [21]. Выходными функциями выбраны: гидравлическое сопротивление комбинированного пылеуловителя к его минимальной величине  $\Delta P_0/\Delta P_{\min}$  ( $\Delta P_{\min}$  соответствует наименьшему значению гидравлического сопротивления в исследуемых диапазонах факторов) и эффективность улавливания аппарата  $\eta_0$  [21]. В качестве факторов варьирования приняты: режимный параметр – кратность расходов  $k=0,35-0,75$  и два конструктивных параметра – отношение диаметра выхлопной трубы камеры центробежного отделения к диаметру камеры  $d_{в.тр}/D_k=0,46-0,74$  и отношение диаметра фильтровального рукава к его высоте  $d_p/h_p=0,1-0,14$ .

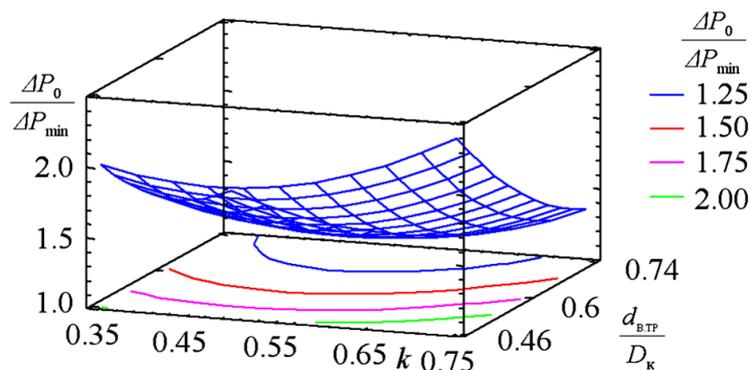
Впервые получены зависимости для расчета и прогнозирования гидравлического сопротивления комбинированного пылеуловителя к его минимальной величине

$$\frac{\Delta P_0}{\Delta P_{\min}} = 9.15 - 4.54k - 10.17 \frac{d_{в.тр}}{D_k} - 19.3 \frac{d_p}{h_p} + 6.2k^2 - 2.9k \frac{d_{в.тр}}{D_k} + 7.25 \left( \frac{d_{в.тр}}{D_k} \right)^2, \quad (2)$$

и эффективности улавливания комбинированного пылеуловителя

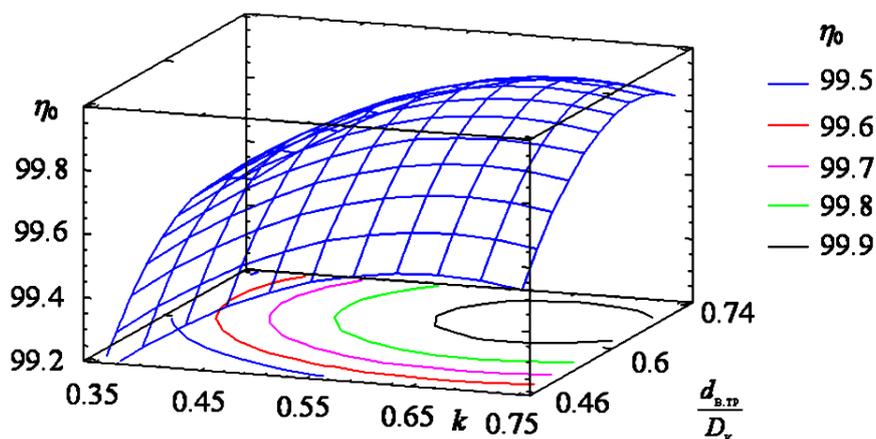
$$\eta_0 = 94.1 + 5.2k + 12.9 \frac{d_{в.тр}}{D_k} - 3.87k^2 - 9.8 \left( \frac{d_{в.тр}}{D_k} \right)^2, \quad (3)$$

В трехмерном пространстве построена зависимость гидравлического сопротивления комбинированного пылеуловителя к его минимальной величине от  $k$  и  $d_{в.тр}/D_k$ . Установлено, что его минимальные значения  $\Delta P_0/\Delta P_{\min}=1,1$  находятся в интервалах  $k=0,35-0,65$  и  $d_{в.тр}/D_k=0,55-0,74$  при  $d_p/h_p=0,14$  (рисунок 7).



**Рисунок 7** — Зависимость гидравлического сопротивления комбинированного пылеуловителя КП-150–1,36 к его минимальной величине от  $k$  и  $d_{в.тр}/D_k$  при  $d_p/h_p=0,14$

Экспериментально исследована зависимость эффективности улавливания мелкодисперсных дробей в комбинированном пылеуловителе от режимно-конструктивных параметров. Установлено, что общая эффективность улавливания дробей в аппарате достигает максимальных значений  $\eta_0=99,9\%$  при  $k=0,6-0,75$ ,  $d_{в.тр}/D_k=0,55-0,65$ ,  $d_p/h_p=0,14$  (рисунок 8) [21]. Анализ полученных результатов показывает, что вследствие высокой степени очистки на стадии центробежного отделения снижается пылевая нагрузка на стадии фильтрования, что и приводит к повышению общей эффективности улавливания комбинированного пылеуловителя.



**Рисунок 8** — Зависимость эффективности улавливания комбинированного пылеуловителя КП-150-1,36 от  $k$  и  $d_{в.тр}/D_k$  при  $d_p/h_p=0,14$



а)



б)

а) – групповой вихревой противоточный пылеуловитель ГВП-750-2;  
б) – комбинированный пылеуловитель КП-350-10

**Рисунок 9** — Общий вид разработанных и внедренных в производство пылеуловителей на основе взаимодействующих вихревых потоков

По результатам проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработаны, изготовлены и внедрены в производство: вихревые противоточные пылеуловители ВПП–200, ВПП–300, ВПП–350, ВПП–400, ВПП–500, ВПП–600, ВПП–650, ВПП–700; прямоточный вихревой пылеуловитель ПВП–600; групповые вихревые противоточные пылеуловители ГВП–750-2 производительностью по запыленному газу  $Q_0=22520\div 26280$  м<sup>3</sup>/ч на ОАО «Мозырьсоль» (рисунок 9а) и БВП–350–2 на ОАО «Лидапищеконцентраты»; комбинированные пылеуловители КП–350–10 (рисунок 9б) (диаметр камеры центробежного отделения  $D_k=0,35$  м, площадь фильтрования  $S_\phi=10$  м<sup>2</sup>; аппарат рассчитан на общий расход газа  $Q_0=2100$  м<sup>3</sup>/ч) и КП–400–10 ( $D_k=0,4$  м,  $S_\phi=10$  м<sup>2</sup>,  $Q_0=3000$  м<sup>3</sup>/ч) в системах аспирации для улавливания сахарной пудры в линии № 1 и № 2 производства зефира на ОАО «Красный Мозырянин».

### Выводы

В работе предложена новая классификация закрученных потоков на основе способов генерации движения и взаимодействия их между собой. Разработана математическая модель движения двух периферийного и центрального спутно закрученных потоков газовой фазы. Получено численное решение системы дифференциальных уравнений Навье-Стокса и неразрывности с помощью  $(k-\epsilon)$  - модели турбулентности. Изучена гидродинамика движения двух спутно закрученных потоков газовой фазы в прямоточных вихревых пылеуловителях в зависимости от кратности расходов  $k$ . Установлено, что при  $k=0,85$  возрастает интенсивность течения газа в периферийной области и снижается в центральной части, вблизи завихрителя, где появляется зона кольцевого течения газа (т.е. зона вихреобразования). Исследована гидродинамика лабораторного образца вихревого пылеуловителя с прозрачным цилиндрическим корпусом для визуализации протекающих процессов в сепарационной зоне при движении и взаимодействии двух закрученных запыленных потоков. Впервые установлено образование “вращающегося кольца” дисперсного материала в сепарационной камере при изменении кратности расходов в интервале  $k=0\div 0,5$ , а при  $k=0,6\div 0,8$  достигается наибольшая эффективность улавливания мелкодисперсных частиц комбикормовой пыли в лабораторном образце вихревого пылеуловителя.

Разработаны новые способы и конструкции пылеуловителей на основе взаимодействующих вихревых потоков, которые существенно расширяют область их применения и повышают эффективность очистки газовых потоков от мелкодисперсных твердых частиц. Это вихревые противоточные и прямоточные пылеуловители. Созданы экспериментальные образцы данных аппаратов и проведены исследования гидравлического сопротивления и эффективности их улавливания. Дан сравнительный анализ вихревых пылеуловителей различного типа и определено, что при одинаковых режимах работы прямоточный вихревой пылеуловитель (ПВП) характеризуется меньшим гидравлическим сопротивлением, чем вихревой противоточный пылеуловитель (ВПП), обеспечивая при этом достаточно высокую эффективность улавливания дисперсных материалов.

Для очистки больших объемов запыленного газа разработаны новые способы, которые реализованы в групповых вихревых противоточных и прямоточных пылеуловителях. Впервые получена зависимость для расчета гидравлического сопротивления групповых противоточных вихревых пылеуловителей. Созданы экспериментальные образцы и проведены исследования гидравлического сопротивления и эффективности улавливания групповых вихревых пылеуловителей от кратности расходов  $k$  и конструктивных параметров.

Разработан новый способ и конструкция комбинированного пылеуловителя, в которой улавливание взвешенных частиц происходит в центробежном поле в системе двух взаимодействующих вихревых потоков, закрученных в одном направлении и движущихся навстречу друг другу с последующей доочисткой газа фильтрованием. Создан лабораторный образец комбинированного пылеуловителя и проведены экспериментальные исследования. Впервые получены зависимости для расчета и прогнозирования гидравлического сопротивления комбинированного пылеуловителя к его минимальной величине и эффективности его улавливания.

По результатам проведенных исследований разработаны, изготовлены и внедрены в производство более 60 вихревых пылеуловителей различного типа.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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. – Минск: Вышэйшая школа, 2019. – 376 с.
2. Сажин, Б.С. Вихревые пылеуловители / Б.С. Сажин, Л.И. Гудим. – Москва: Химия, 1995. – 144 с.
3. Акулич, А.В. Эффективные способы и вихревые аппараты для очистки пылегазовых выбросов от мелкодисперсных частиц/ А.В. Акулич, В.М. Лустенков, А.А. Акулич // Вестник МГУП. – 2018. – № 1 (24). – С. 75–81.
4. Акулич А.В. Разработка высокоэффективных вихревых аппаратов с управляемой гидродинамикой для сушки и улавливания в химической и текстильной промышленности. / Автореф. дис.... докт. техн. наук. М.: Москов. текстильная академия, 1999.
5. Акулич А.В., Акулич А.А., Лукачевский Б.П., Лустенков В.М. Энергоэффективные способы и оборудование на основе закрученных потоков для очистки пылегазовых потоков на предприятиях пищевой и химической промышленности. Сборник научных трудов Международного научно-технического симпозиума «Вторые международные Косыгинские чтения: «Энергоресурсоэффективные экологически безопасные технологии и оборудование», приуроченные к 100-летию РГУ имени А.Н.Косыгина»: Т. 1 / М.: ФГБОУ ВО «РГУ имени А.Н.Косыгина», 2019. – с.12-16.
6. Акулич А.В. Теоретические основы и методы расчета вихревых аппаратов с управляемой гидродинамикой для сушки и сепарации пищевых дисперсных материалов. Сборник научных трудов. К 30-летию Могилевского государственного университета продовольствия. – Мн.: Изд. Центр БГУ, 2003.- с. 178-182.
7. Акулич А.В., Сажин Б.С., Егоров А.Г. Моделирование движения газовой фазы в прямоточном вихревом пылеуловителе. Изв. вузов. Технология текстильной промышленности, 1998, № 4, с. 96-100.
8. Сажин Б.С., Акулич А.В., Сажин В.Б. Математическое моделирование движения газа в сепарационной зоне прямоточного вихревого аппарата на основе (к<sub>т</sub> - ε)- модели турбулентности. ТОХТ, № 5, 2001, с.472-478.
9. Акулич А. В. Новое в теории и технике очистки газов от пыли на основе взаимодействующих вихревых потоков / Вестник МГУП. – 2012. – № 2 (13). – С. 101–106.
10. Акулич А.В., Лустенков В.М., Акулич В.М., Жуков А.Ю., Давыдик Ю.Ю. Исследование гидродинамики вихревого пылеуловителя с визуализацией протекающих процессов и разработка метода управления взаимодействием вихревых потоков.. Вестник МГУП, № 2 (29), 2020. – с. 83-92.
11. Акулич А.В. Совершенствование вихревых аппаратов для сушки и сепарации дисперсных материалов. Доклады IV Минского международного форума по теплообмену. ММФ-2000. Теплообмен в процессах сушки, т.9, Минск 2000, с. 49-56.
12. Вихревой пылеуловитель: а.с. 1466795 СССР / Б.С. Сажин, Б.П. Лукачевский, А.В. Акулич, А.И. Буяров, П.В. Акулич, Н.И. Кикабидзе; Моск. текст ин-т. // Открытия. Изобретения. – 1989. – № 11. – С. 28.
13. Устройство для выделения частиц из газового потока: пат. 3475 Респ. Беларусь / А.В. Акулич, Б.С.Сажин, П.В.Акулич, А.Г.Егоров; заявитель Могил.технол. ин-т. // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2000. – № 3. – С. 93-94.
14. Патент. РБ № 3476 ВУ, МПК ВОЧС 3/06 . Устройство для выделения частиц из газового потока / А.В.Акулич, П.В.Акулич, А.Г.Егоров, В.Я.Ковалев. - № 970654; Заявл. Опубл. 2000 // Афіцыйны бюлетэнь Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь. – 2000. - № 3.
15. Способ очистки газа от твердых частиц: Евразийский патент 029246, В1 В01D 50/00 / А.В. Акулич, В.М. Лустенков, А.А. Акулич; заявитель Могил.гос. ун-т продовольствия.– № 201500461; заявл. 01.04.2015; выдан 28.02.2018.

16. Акулич А.В., Шушкевич К.В. Групповой вихревой пылеуловитель. Патент Республики Беларусь 8329, МПК<sup>7</sup> В 04С 3/06, 5/28, 2006.

17. Акулич А.В., Шушкевич К.В., Акулич А.А. Батарейный вихревой пылеуловитель. Патент Республики Беларусь 17948, МПК<sup>7</sup> В 04С 3/06, 2014.

18. Акулич А.В., Лустенков В.М., Акулич А.А. Новые способы очистки газов и групповые пылеуловители на основе взаимодействующих вихревых потоков. Сборник научных трудов VI-ого Международного научно-технического Симпозиума “Современные энерго- и ресурсосберегающие технологии СЭТТ–2017” Международного научно-технического Форума Первые международные Косыгинские чтения“ (11–12 октября 2017 года) Т.2 / М.:ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина», 2017. С. 47–52.

19. Способ очистки газа от твердых частиц: пат. 6280 Респ. Беларусь, МПК<sup>7</sup> В 04 С 3/04, В 01 D 45/12 / А.В. Акулич; заявитель Могил. технол. ин-т. – № а 20001037; заявл. 22.11.00; опубл. 30.06.04. – № 2. –С. 140.

20. Комбинированный пылеуловитель: пат. 8290 Респ. Беларусь, МПК<sup>7</sup> В 01 D 46/02, В 04 С 3/06 / А.В. Акулич, В.М. Лустенков; заявитель Могил. гос. ун-т продовольствия.– № а 20030016; заявл. 05.01.02; опубл. 30.08.06 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2006. – №4. – С. 52-53.

21. Акулич А.В., Лустенков В.М. Исследование гидравлического сопротивления комбинированного пылеуловителя // ИФЖ.– 2005.– Т. 78. № 4.– С. 158–162.

**СТРАТЕГИЯ И КЕЙС-СТАДИ ГЛОБАЛЬНОГО ПРОДВИЖЕНИЯ РОССИЙСКИХ  
ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
STRATEGY AND CASE-STUDY OF RUSSIAN INNOVATIVE  
TECHNOLOGIES GLOBAL PROMOTION**

**Шин Кванг-хи  
Shin Kvang Khi**

*Председатель экономического форума сотрудничества между  
Кореей и Россией (World OKTA)*

*Почетный президент московского отделения World Federation of Overseas Korean Traders  
Associations (World OKTA) SBER A Advisor of G. Director  
KOSME Moscow GBC Advisor  
(e-mail: kecrus@gmail.com)*

*Аннотация:* Рассмотрена структура, ограничения и основные особенности российских инновационных технологий, разработана стратегия их продвижения на международном уровне, приведен кейс-стади с наглядным примером сотрудничества корейской компании и российской научной базы.

*Abstract:* In this work we have studied the structure, limitations and main features of Russian innovative technologies, developed a strategy for their promotion at the international level, and presented a case study with an example of cooperation between a Korean company and a Russian science.

*Ключевые слова:* инновационные технологии, международное сотрудничество, Республика Корея, Россия, продвижение технологий.

*Keywords:* innovative technologies, international cooperation, Republic of Korea, Russia, technology promotion.

**Стратегия продвижения**

Россия традиционно известна как страна с высоко развитой наукой и технологиями. Однако, несмотря на такой статус, выход на глобальный рынок в сфере актуальных научных открытий и новых технологий имеет некоторые ограничения, которые главным образом связаны с нехваткой научно-технических кадров. Глобальное продвижение выдающихся научно-технических компаний, инженеров и непосредственно технологий является приоритетной задачей России.

В стратегию, необходимую для выхода российских науки и технологий на мировой рынок, входит следующее: получение информации о рынке через участие в международных мероприятиях по обмену технологиями; развитие науки и технологий, необходимых на мировом рынке; обеспечение финансовой поддержки в сфере международных инвестиций; обучение и подготовка первоклассных специалистов и развитие международных научных талантов; создание инфраструктуры для исследований и научных разработок посредством установления связей между промышленностью, научными и исследовательскими кругами.

На глобальном рынке уже сейчас существует потенциальный спрос на российскую науку и технологии, а развитие рынка, способного к индустриализации и коммерциализации, является актуальной задачей не только для компаний, продвигающих международную торговлю, но и для российской научно-технической сферы. Вместо того, чтобы продвигаться на мировой рынок в одиночку, подчёркивая своё новаторство, необходим стратегический рыночный подход, такой как совместный выход на рынок. Кроме того, можно ожидать, что совместное развитие рынка экспертов в каждой области будет иметь очень эффективный

синергетический эффект и окажет большую помощь развитию российской науки и технологий за счет продвижения совместных международных исследовательских проектов.

В последнее время растет интерес к азиатскому рынку, и для выхода на южнокорейский рынок который, в свою очередь, проявляет большой интерес к российской науке и технологиям, необходим более стратегический и инновационный маркетинг.

Кейс-стади продвижения

Одной из выдающихся сфер научных технологий России является область композиционных материалов. Эта сфера берёт своё начало с реализации оригинальных российских технологий и их коммерциализации. Сопутствующее оборудование области производится в России, откуда и поставляется на мировой рынок.

Далее будет приведен пример успешного объединения южнокорейских IT-технологий с российской наукой и технологическими мощностями. Южнокорейская компания N основала в Республике Корея производственную компанию, основанную на российских технологиях, посредством технического сотрудничества и приобретения мощностей в России, и начала производить более инновационную продукцию из композитных материалов путем слияния с южнокорейскими химическими технологиями.

Введение технологии Full-to-Rezone, производство которой впервые началось в Республике Корея, позволило прогнозировать рыночный спрос в стране, способствовало автоматизации производства, конкретизировало среду производства, подходящую для корейского рынка, а также стимулировало продвижение производства сопутствующих продуктов.

Вместо того, чтобы применять российские инновационные технологии как таковые, была разработана стратегия создания конкурентного преимущества при выходе на мировой рынок за счет автоматизации и инноваций в области сырья, подходящего для местного рынка, экспортируя продукцию не только на южнокорейский, но также на азиатский и южноамериканский рынки.

С этой целью южнокорейские компании используют российские технологические патенты и локализуют эти технологии, на ранних этапах приглашают российских инженеров для контроля и стабилизации применения этих технологий, а также добиваются международной конкурентоспособности за счет постоянного мониторинга и применения научных инноваций.

Таким образом, можно с уверенностью сказать, что вышеописанное сотрудничество оценивается как успешный пример объединения южнокорейских IT-технологий с российской наукой и технологическими мощностями.

**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ В МИКРО-И МАКРОМАСШТАБНЫХ  
РЕАКТОРАХ ДЛЯ КОНТРОЛИРУЕМОГО СИНТЕЗА ОРГАНИЧЕСКИХ И  
НЕОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ**  
**INTENSIFICATION OF PROCESSES IN MICRO-AND MACRO-SCALE REACTORS  
FOR CONTROLLED SYNTHESIS OF ORGANIC AND INORGANIC SUBSTANCES**

**Руфат Шовкетович Абиев\*\*\*\***  
**Rufat Sh. Abiyev\*\*\*\***

\* *Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Россия, Санкт-Петербург*

\* *St. Petersburg State Technological Institute (Technical University), Russia, St. Petersburg*

\*\* *Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Россия, Санкт-Петербург*

\*\* *Physicotechnical Institute named after A.F. Ioffe RAS, Russia, St. Petersburg*

\*\*\* *Институт химии силикатов им. И.В. Гребенищикова РАН, Россия, Санкт-Петербург*

\*\*\* *Institute of Chemistry of Silicates named after I.V. Grebenschikov RAS, Russia, St. Petersburg  
(e-mail: abiev.rufat@gmail.com)*

*Аннотация:* Рассмотрено современное состояние и химических реакторов и биореакторов для синтеза органических и неорганических химических веществ. Обсуждаются различные подходы к интенсификации как за счет миниатюризации аппаратного оформления, так и за счет снижения диффузионного сопротивления в потоках в макромасштабных аппаратах. Показано, что в двухфазных потоках повышению интенсивности процессов способствуют вихри Тейлора, возникающие при ламинарном движении. В однофазных потоках благоприятные условия создаются за счет концентрирования кинетической энергии потока в малом объеме (не более 1 мл), что обеспечивает высокое качество микросмешения, а значит, и стехиометрическое соотношение атомов в синтезируемом продукте. Макромасштабные реакторы нового типа характеризуются увеличенными значениями коэффициентов тепло- и массопереноса.

*Abstract:* The current state of both chemical reactors and bioreactors for the synthesis of organic and inorganic chemicals is considered. Various approaches to intensification are discussed both due to miniaturization of hardware design, and due to a decrease in diffusion resistance in flows in macroscale devices. It has been shown that in two-phase flows, Taylor vortices arising from laminar movement contribute to increasing the intensity of processes. In single-phase streams, favorable conditions are created by concentrating the kinetic energy of the stream in a small volume (not more than 1 ml), which ensures a high quality of micro-mixing, and therefore the stoichiometric ratio of atoms in the synthesized product. Macroscale reactors of a new type are characterized by increased values of heat and mass transfer coefficients.

*Ключевые слова:* химические реакторы; биореакторы; микрореакторы; органические и неорганические вещества; синтез; интенсификация.

*Keywords:* chemical reactors; bioreactors; microreactors; organic and inorganic substances; synthesis; intensification.

Под интенсификацией процессов в классических учебниках обычно понимают увеличение их скорости. При заданной производительности увеличение скорости сопряжено с уменьшением габаритов оборудования, что и было сформулировано в 1995 г. К. Рамшоу [1] как стратегия резкого уменьшения размеров химического оборудования: “Process Intensification (PI) is a... “strategy for making **dramatic reductions in the size of a chemical plant so as to reach a given production objective**”. В 2011 г. в г. Дельфте (Нидерланды) большой международной группой ученых сформулирован план исследований в области

интенсификации процессов на период до 2050 г., в котором редакторы (A. Gorak и A. Stankiewicz) заявили [2]: «С ростом популяции назрела смена парадигмы в принципах организации химических процессов». Кратко идею интенсификации процессов в химии формулируют так: технологии должны стать миниатюрнее, энергоэффективнее (экономичнее) и безопаснее (экологически чище) (англ. слоган – Safer, Cleaner, Smaller) [3].

Следует заметить, что интенсификация процессов отнюдь не сводится только к микрореакторам или высокоэффективным способам гомогенизации на микро- и макромасштабе. В работе [3] приведены схемы оборудования (hardware) и методов (software) интенсификации процессов, в том числе включающих химические реакции. В [4] обсуждаются новые подходы к интенсификации в многофункциональных реакторах. Важной и быстро развивающейся областью интенсификации являются гибридные методы сепарации (мембранно-абсорбционные, мембранно-ректификационные, адсорбционно-ректификационные), совмещенные процессы (реактивная ректификация, реактивная экстракция, реактивная кристаллизация) и другие [3].

Заметим, что принципы интенсификации коррелируют с некоторыми принципами зелёной химии [5]:

Принцип 1. *Лучше предотвратить потери, чем перерабатывать и чистить остатки – увеличение конверсии и скорости процессов в микрореакторном синтезе, в новых химических реакторах*

Принцип 2. *Методы синтеза надо выбирать таким образом, чтобы все материалы, использованные в процессе, были максимально переведены в конечный продукт – увеличение конверсии и скорости процессов в микрореакторном синтезе, в новых химических реакторах*

Принцип 4. *Создавая новые химические продукты, надо стараться сохранить эффективность работы, достигнутую ранее, при этом токсичность должна уменьшаться – энергосбережение в новых химических реакторах, уменьшение габаритов, исключение токсичных растворителей*

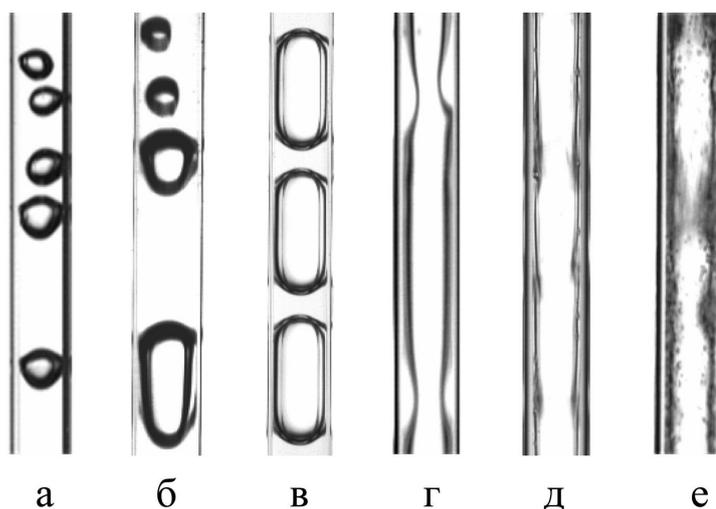
Принцип 12. *Вещества и формы веществ, используемые в химических процессах, нужно выбирать таким образом, чтобы риск химической опасности, включая утечки, взрыв и пожар, были минимальными – обеспечение безопасности в микрореакторах, в пульсационных аппаратах периодического действия*

Цель данного обзора – отразить текущее состояние исследований и разработок, проводимых в нашей стране и за рубежом, в области химических реакторов и биореакторов, в особенности направленных на интенсификацию процессов синтеза органических и неорганических веществ.

### **Контролируемый синтез в двухфазных потоках**

Наиболее благоприятным для проведения различных процессов в двухфазных потоках считают тейлоровский (снарядный) режим течения (рис. 1), преимуществами которого являются: 1) сочетание умеренных скоростей (а значит, достаточного времени пребывания) с достаточно интенсивным перемешиванием внутри сплошной и дисперсной фаз, обусловленных наличием тейлоровских вихрей; 2) малая толщина пленки вокруг пузырей/капель дисперсной фазы, что позволяет; 3) регулярный характер течения, что позволяет относительно легко контролировать параметры течения, а значит, и прогнозировать характеристики реактора.

На гидродинамику двухфазной смеси существенно влияют расходы сред и их свойства, а она, в свою очередь, определяет условия тепло- и массообмена, и, в конечном счете, наряду с истинной кинетикой влияет на характеристики реактора.



**Рисунок 1** — Характерные режимы течения двухфазной смеси (жидкость-газ) в микро- и милликаналах [6] (здесь – в капилляре квадратного сечения с гидравлическим диаметром 1,0 мм): а) пузырьковое; б) переход от пузырькового к снарядному течению; в) снарядное; г) переход от снарядного к пленочному течению; д) пленочное; е) эмульсионное (пленочно-капельное).

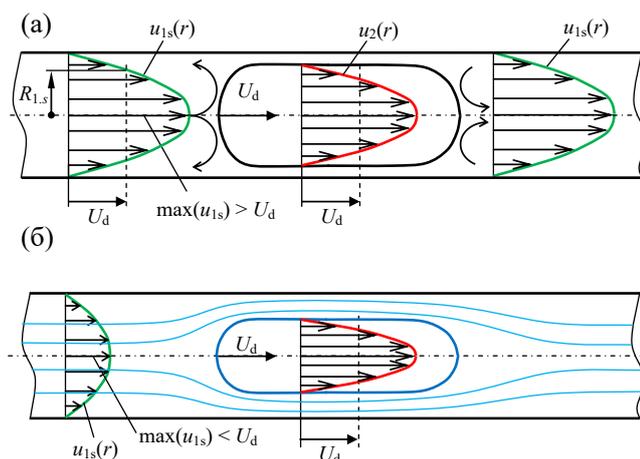
Вихри Тейлора (тейлоровская циркуляция) в двухфазном снарядном течении были предсказаны Дж. Тейлором в 1961 г. [7] и возникают благодаря различию профиля скорости в сплошной фазе и средней скорости пузыря или капли дисперсной фазы. Из схемы видно (рис. 2а), что тейлоровская циркуляция возникает при условиях, когда скорость в сплошной фазе  $u_{1s}$  превышает среднюю скорость пузыря или капли  $U_d$  ( $\max(u_{1s}) > U_d$ ). Чем больше скорость дисперсной фазы, тем уже зона циркуляции, а при условии  $\max(u_{1s}) < U_d$  циркуляция исчезает, и течение переходит в байпасное (рис. 2б), когда пузырь/капля обтекается потоком сплошной фазы с незамкнутыми линиями тока.

Дж. Тейлор предсказал условие перехода от циркуляционного режима течения к байпасному обтеканию пузыря (или капли) достижением критического значения капиллярного числа  $Ca = 0.707$ . В дальнейших экспериментальных и численных исследованиях это значение варьировалось от 0.4 до 0.9. Ранее эти вариации были объяснены нами [8] разными углами наклона микроканала – от нисходящего к горизонтальному течению и далее к восходящему; там же предложен обобщенное число Бонда, учитывающее угол наклона капилляра к горизонту и направление течения.

Недавно опубликованы работы, позволяющие рассчитывать размер циркуляционной зоны в зависимости от реологических констант для жидкостей со степенным реологическим законом [9-10].

Вихри Тейлора играют ключевую роль в интенсификации процессов тепло- и массообмена, сопровождающих химические превращения в микрореакторных условиях, поскольку в ламинарном потоке возникает радиальное движение, переносящее вещество и энергию из пристенной области в осевую зону потока. В работе [10] показано, что тейлоровская циркуляция имеет место внутри капель и пузырей дисперсной фазы, там же рассчитана скорость циркуляции в обеих фазах.

В одной из наших работ выдвинута гипотеза о ключевой роли частоты циркуляции вихрей в процессах массообмена, подтвержденная многочисленными экспериментальными данными [10-12].



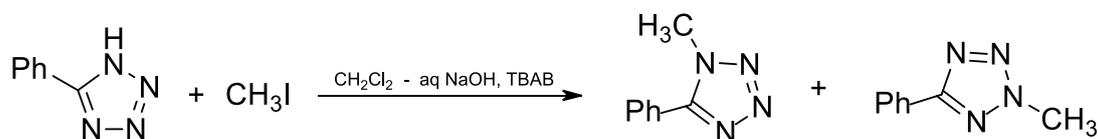
**Рисунок 2** — Схема, иллюстрирующая возникновение тейлоровской циркуляции в двухфазном течении [10]: а – циркуляционный режим ( $\max(u_{1s}) > U_d$ ), б – байпасный режим ( $\max(u_{1s}) < U_d$ ).  $u_{1s}(r)$ ,  $u_2(r)$  – профили скорости в сплошной и дисперсной фазе, соответственно;  $\max(u_{1s})$  – максимальная скорость в сплошной фазе;  $U_d$  – средняя скорость дисперсной фазы;  $R_{1.5}$  – радиус зоны циркуляционного течения в сплошной фазе.

В ряде работ показано [13], что интенсификация массопереноса приводит к существенному увеличению скорости накопления продукта в гетерофазных реакциях, даже без использования катализатора межфазного переноса.

Интенсивное смешение на уровне масштаба менее 1 мм, обусловленное тейлоровскими вихрями, способствовало применению двухфазных микрореакторов для синтеза как органических, так и неорганических веществ. Для органических соединений, получение которых сопряжено с образованием взрывоопасных продуктов, применение микрореакторов имеет еще одно преимущество: диаметр каналов может быть принят меньше критического для данной группы веществ. Отметим, что в промышленном микрореакторе может быть задействовано несколько десятков тысяч параллельных микроканалов, т.е. название здесь обусловлено поперечным размером каналов (порядка 1 мм или менее), а производительность сопоставима с таковой для стандартных видов химического оборудования.

*Безопасный микрореакторный синтез гетероциклических соединений – 1-метил-5-фенилтетразола*

В одной из наших работ [14] проведены сравнительные исследования процесса алкилирования 5-фенилтетразола с получением 1-метил-5-фенилтетразола и 2-метил-5-фенилтетразола в реакторе с магнитной мешалкой и в микрореакторе (рис. 3). Микрореактор был выполнен из стеклянного капилляра диаметром 1.5 мм и длиной 2 м. Для увеличения межфазной поверхности в реакторе с магнитной мешалкой использовался высокоскоростной аппарат типа ротор-статор (атомайзер) марки IKA ULTRA-TURRAX Package T18. В реакторе с магнитной мешалкой использовался тетрабутил аммоний бромистый в качестве катализатора межфазного переноса, тогда как в микрореакторе удалось повысить выход и селективность реакции без применения катализатора межфазного переноса. В водной (сплошной) фазе (водный раствор NaOH) был растворен 5-фенилтетразол, а в органической фазе (дихлорметане) – иодистый метил. Режим течения двухфазной смеси в микрореакторе – тейлоровский.



**Рисунок 3** — Схема алкилирования 5-фенилтетразола иодистым метилом в двухфазной реакционной системе хлористый метилен– NaOH (aq.).

Сделан вывод о том, что в микрореакторах повышение выхода и селективности реакции (по 1-метил-5-фенилтетразолу) достигается за счет интенсификации массопереноса внутри каждой из фаз благодаря тейлоровским вихрям, которые подводят молекулы реагентов к межфазной границе за счет конвективного механизма. Оценка числа Пекле, отвечающего за отношение конвективного переноса к молекулярно-диффузионному, дает значения  $Pe \approx 3 \times 10^5$ , чем и подтверждается указанный вывод.

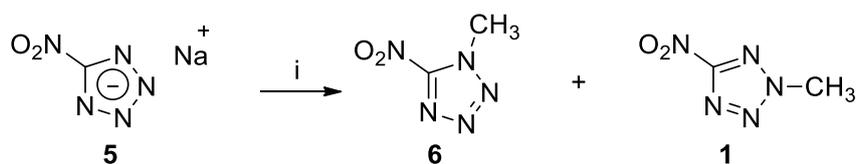
2-Метил-5-нитротетразол является компонентом энергонасыщенных систем и материалов [15, 16]. Алкилирование 5-замещенных тетразолов – наиболее распространенный процесс получения 2-замещенных и 2,5-дизамещенных тетразолов. Один из традиционных методов получения основан на алкилировании 5-аминотетразола с образованием региоизомеров и диазотировании 2-метил-5-аминотетразола нитритом натрия в среде серной кислоты [17, 18]. В данной реакции образуются региоизомеры, причем преимущественно 1-метил-5-аминотетразол. После разделения региоизомеров 2-метил-5-аминотетразол выделяют с выходом, не превышающим 15%.

Более перспективным является способ, основанный на алкилировании натриевой соли 5-нитротетразола, не требующий предварительного получения 2-метил-5-аминотетразола. В результате алкилирования также образуется смесь  $N^2$ - и  $N^1$ -региоизомеров, однако за счет электроноакцепторного характера нитрогруппы в положении 5 тетразольного цикла основным продуктом реакции является именно 2-метил-5-нитротетразол [19]. Натриевую соль 5-нитротетразола в форме тетрагидрата обычно получают из 5-аминотетразола по реакции Зандмейера в присутствии солей меди. Данный метод взрывоопасен из-за образования в ходе реакции нестабильного интермедиата – 5-диазотетразола; потенциально опасной является также стадия фильтрования тетрагидрата 5-нитротетразола меди, по свойствам близкого к инициирующим взрывчатым веществам [5].

Альтернативный метод синтеза тетрагидрата натриевой соли 5-нитротетразола с выходом 70-80% основан на диазотировании 5-аминотетразола нитритом натрия, взятом в избыточном количестве, проводят в среде разбавленной водной серной кислоты при нагревании. Тетрагидрат натриевой соли 5-нитротетразола выделяют упариванием водного реакционного раствора. Данная стадия несет потенциальную опасность, связанную со способностью тетрагидрата уже при температуре выше  $50^\circ\text{C}$  терять кристаллогидратную воду, превращаясь в безводную натриевую соль 5-нитротетразола **5**, весьма чувствительную к первичным импульсам [20, 21].

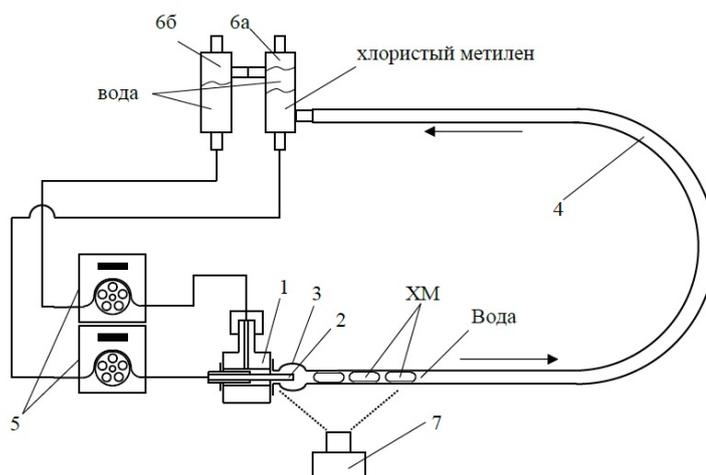
Алкилирование натриевой соли 5-нитротетразола можно проводить в двухфазной системе «вода – органический растворитель» [20]. В этой работе в качестве водной фазы был использован модельный раствор, полученный путем растворения кристаллического тетрагидрата натриевой соли 5-нитротетразола в дистиллированной воде (рН 6.5). В качестве органической фазы – раствор алкилирующего агента (диметилсульфата) в хлористом метиле; реакцию проводили при  $25^\circ\text{C}$  в присутствии катализатора межфазного переноса – тетрабутиламмония бромистого (рис. 4). В качестве субстрата в этом случае выступает тетрабутиламмониевая соль 5-нитротетразола, образующаяся в результате обмена ионами натрия и тетрабутиламмония. Основным недостатком указанного метода является необходимость применения катализатора межфазного переноса, а также использования высокоскоростных перемешивающих устройств.

Перспективным направлением синтеза энергонасыщенных материалов являются двухфазные микрореакторы. Важными особенностями микрореакторов, с точки зрения интенсификации тепло- и массообменных процессов, являются: 1) короткий путь перемешивания для молекул реагентов в пределах каждого из структурных элементов двухфазного течения – капель и жидкостных снарядов, 2) интенсивная циркуляция внутри них, обусловленная тейлоровскими вихрями, имеющая место при снарядном режиме течения; 3) возможность жесткого контроля температуры процесса, связанная с малым размером микроканала (диаметр не более 2–3 мм) [6].



i:  $(\text{MeO})_2\text{SO}_2$ , ТВАВ,  $\text{H}_2\text{O}-\text{CH}_2\text{Cl}_2$ ,  $25^\circ\text{C}$ , 81%.

**Рисунок 4** — Схема алкилирования натриевой соли 5-нитротетразола в двухфазной системе «вода – органический растворитель».



**Рисунок 5** — Схема микрореакторной установки для проведения алкилирования натриевой соли 5-нитротетразола диметилсульфатом в двухфазной системе вода-хлористый метилен [13]:

- 1 – Т-образный блок сопряжения; 2 – игла для ввода газа; 3 – соосно-сферический диспергатор; 4 – реакционное пространство (микроканал); 5 – перистальтические насосы; 6а, 6б – сепараторы; 7 – цифровая фотокамера Canon 20D.

Алкилирование проводили в микрореакторе проточного типа (рис. 5). Водная (концентрация натриевой соли 5-нитротетразола  $2.01 \cdot 10^{-2}$  моль/л) и органическая (концентрация диметилсульфата  $4.02 \cdot 10^{-1}$  моль/л) фазы насосами 5 подаются в смеситель 1: сплошная фаза (вода) в кольцевой канал между иглой 2 и стенкой капилляра 4, дисперсная (хлористый метилен) – в иглу 2, установленную соосно по отношению к главному каналу. В микрореакторе формируется снарядный режим течения. После прохождения канала 4 двухфазная система попадает в первый сепаратор 6а, где происходит ее разделение. Легкая фаза – вода – скапливается в верхней части первого сепаратора 6а и переливается во второй сепаратор 6б, который служит в роли накопителя водной фазы. Далее фазы вновь подаются в насосы 5 и в смеситель 1 [13].

Несмотря на более крупные размеры капель, создаваемых в микрореакторе (и существенно меньшее значение удельной поверхности контакта фаз – на порядок и более), по сравнению с аппаратами с магнитной мешалкой и высокоскоростным диспергатором, в микрореакторе удается достичь поверхностного коэффициента массоотдачи в 50 раз выше без использования межфазного катализатора и в 3–4 раза – при его использовании.

Для удобства контроля за размерами капель/пузырей дисперсной фазы разработан и исследован соосно-сферический диспергатор, обладающий по сравнению со стандартными Т-образными микросмесителями дополнительной степенью свободы – расположением конца иглы по отношению к сферическому расширению, а также объемом и формой зоны расширения.

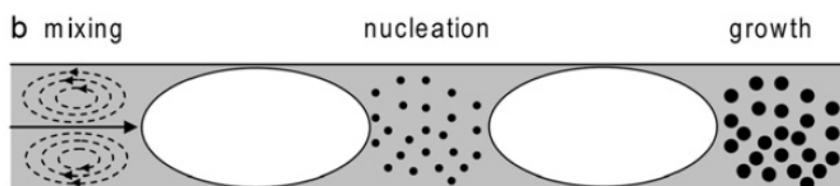
Еще одним интересным, но пока мало разработанным направлением применения двухфазных микрореакторов является синтез наночастиц неорганических веществ в каплях сплошной [22] либо (чаще) дисперсной фазы [23] (рис. 6). В первом случае в качестве

дисперсной фазы может выступать инертный газ. Идея метода заключается в следующем: в одну из фаз двухфазного потока вводят растворы реагентов, которые благодаря интенсивным тейлоровским вихрям смешиваются; по мере продвижения вдоль оси реактора происходит нуклеация и рост частиц (рис. 7).

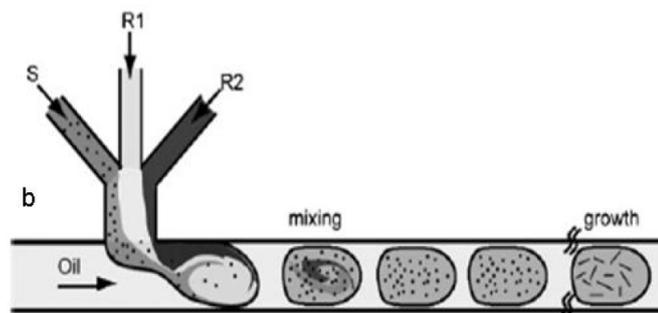
С использованием указанного метода синтезированы нанонити Au [23], плазмонные наночастицы (наночастицы Ag) размером 25–30 нм, квантовые точки CdSe размером 1.4 и 1.8 нм [24]. При этом за счет длины и диаметра зоны нуклеации и зоны роста можно варьировать продолжительность времени пребывания частиц в этих зонах, а значит, и размеры частиц.

В работе [25] показано, что размер синтезируемых в микрореакторе наночастиц Pt и Au в 2–5 раз меньше, чем при традиционном синтезе соосаждением. Полученные частицы могут быть использованы для получения водорода, в качестве катализатора при гидролизе борана аммиака  $H_3NBH_3$  [26, 27].

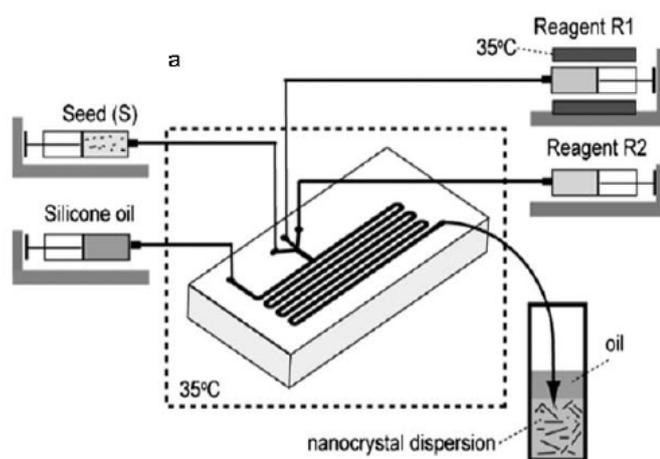
(a)



(б)



**Рисунок 6** — Синтез наночастиц в микрореакторах с двухфазным потоком (типа вода/масло): а – в сплошной фазе [22]; б – в дисперсной фазе [23]; mixing – смешение, nucleation – нуклеация; growth – рост частиц; R1, R2 – реагенты 1 и 2, S – зародыши.



**Рисунок 7** — Пример аппаратной реализации микрореакторного синтеза наночастиц в двухфазном потоке [23]. R1, R2 – реагенты 1 и 2, Seed (S) – зародыши; Silicone oil, oil – силиконовое масло; nanocrystal dispersion – дисперсия нанокристаллов.

Математическое моделирование гидродинамики и массопереноса является не только ключом к фундаментальным основам процессов и явлений в двухфазных средах, но и

инструментом для управления этими процессами, в том числе при протекании химических реакций. Наиболее часто в последние десятилетия применяют численные методы моделирования, основанные на решении классических уравнений сохранения массы, импульса и энергии, в дискретной трактовке [28, 29]. Численные решения дают довольно подробную информацию о полях скоростей, давлений, концентраций в двухфазном потоке. Получение единичного решения может занимать несколько суток на современных компьютерах, а обобщение полученных результатов требует глубокого понимания взаимосвязей явлений переноса в различных объектах течения.

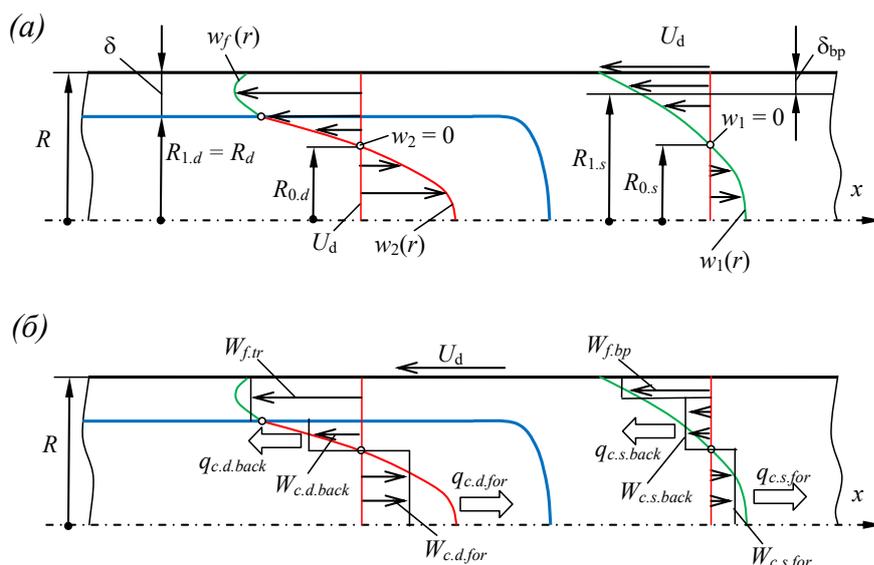
По этой причине нами была сформулирована и в целом решена задача разработки математической модели на основе «первопринципных» теоретических представлений (с приемлемыми допущениями), которая позволила бы получать адекватное решение задач гидродинамики и массопереноса в двухфазных потоках в микроканалах. Адекватность полученных решений подтверждена сходимостью с результатами многочисленных экспериментов [7, 9, 12, 29 – 31].

В наших работах [7, 9] предложена математическая модель гидродинамики, основанная на решении системы уравнений Навье-Стокса и неразрывности для двухфазного потока. При этом концевые эффекты на концах вытянутых пузырей (капель) приняты незначительно влияющими на динамику системы. Построенный на основе данной математической модели алгоритм и компьютерная программа позволяют практически мгновенно определять основные гидродинамические параметры течения – профили скорости и касательных напряжений в сплошной и дисперсной фазах, в пленке вокруг капли/пузыря, средние скорости капель/пузырей, пленки. Данная модель дальнейшее развитие при математическом описании циркуляционного и байпасного режимов снарядного течения газожидкостной смеси в капилляре, объемного газосодержания и относительной длины пузырей, потерь давления при снарядном течении. Построенные математические модели были проверены на адекватность экспериментальным результатам [30, 32].

Исследовано влияние гистерезиса угла смачивания на потери давления при снарядном течении в мини- и микроканалах. Применительно к системе жидкость-жидкость указанная модель скорректирована с учетом особенностей пленочного течения вокруг капли дисперсной фазы. Получено экспериментальное подтверждение интенсификации массоотдачи от стенок микроканала при циркуляционном режиме снарядного течения и исчезновение этого эффекта при байпасном режиме.

Разработанные аналитические модели гидродинамики двухфазного течения [7, 9] легли в основу построения трехслойной модели массопереноса. Сущность трехслойной модели (рис. 8) сводится к замене реальных профилей скорости в трех типичных слоях жидкостного снаряда среднеинтегральными значениями скоростей в соответствующих слоях. Эта замена позволяет существенно упростить решение задач тепло- и массопереноса в двухфазном течении, что продемонстрировано на примере моделирования массоотдачи от стенки капилляра к жидкости. Аналогичная замена выполнена и в слоях капли/пузыря дисперсной фазы, в том числе для жидкостей с неньютоновской (степенной) реологией [7, 9].

Переход к трехслойной модели позволяет, с одной стороны, существенно упростить математическое описание процессов тепло- и массопереноса в двухфазном потоке, с другой – получить достаточно высокую точность описания процессов переноса, что подтверждено сопоставлением полученных результатов моделирования с многочисленными экспериментальными и данными [31]. Кроме того, трехслойная модель облегчает понимание многих процессов, протекающих в двухфазном потоке, позволяя интерпретировать результаты численного моделирования после концентраций и экспериментальные результаты. В частности, в работе [31] выявлена существенная роль конвективного переноса, обусловленного тейлоровскими вихрями. Учет конвективных членов в уравнении переноса позволил повысить точность теоретического предсказания коэффициентов массоотдачи и массопередачи в системах жидкость-газ, жидкость-газ-твердая стенка.



**Рисунок 8** — Переход от реальных профилей скорости в капле/пузыре и слое сплошной фазы (а) к среднеинтегральным скоростям в трех слоях (б) [9].

Скорости и расходы показаны относительно наблюдателя, движущегося вместе с каплей/пузырем со скоростью  $U_d$ .  $w_f(r)$  — относительная скорость в пленке;  $w_1(r)$  — относительная скорость в сплошной фазе;  $w_2(r)$  — относительная скорость в дисперсной фазе;  $\delta$  — толщина пленки вокруг дисперсной фазы,  $\delta_{bp}$  — толщина пленки в сплошной фазе;  $R_{0,s}$  — радиус центра тейлоровского вихря в слое;  $R_{1,s}$  — радиус зоны циркуляции в слое;  $R_{0,d}$  — радиус центра тейлоровского вихря в дисперсной фазе;  $R_{1,d}$  — радиус зоны циркуляции в дисперсной фазе;  $q_{c.d.for}$ ,  $q_{c.d.back}$  — средние циркуляционные расходы в дисперсной фазе, в направлении движения и против него, соответственно;  $q_{c.s.for}$ ,  $q_{c.s.back}$  — средние циркуляционные расходы в слое, в направлении движения и против него, соответственно;  $R_d$  — радиус капли дисперсной фазы;  $R$  — радиус микроканала;  $W_{c.d.for}$ ,  $W_{c.d.back}$  — средние скорости в дисперсной фазе, в направлении движения и против него, соответственно;  $W_{c.s.for}$ ,  $W_{c.s.back}$  — средние циркуляционные расходы в слое, в направлении движения и против него, соответственно;  $x$  — продольная координата.

Микрореакторы могут иметь довольно высокую производительность, которая обеспечивается за счет использования большого числа параллельных микроканалов. Изначально микросмесители (в том числе микрореакторы с интенсивным смешением) и микроструктурированные реакторы-смесители были ориентированы на создание оптимальных условий для проведения быстропротекающих реакций, которые требуют быстрого перемешивания. Они были использованы для быстрых реакций в жидкостях (например, синтез органометаллических соединений) или в газах (например, формирование оксида этилена), а также для проведения анализа «в потоке», в том числе для биологических процессов [33]. Перемешивание в микрореакторах происходит, как правило, в ламинарном режиме, и поэтому может использоваться для вязких сред. Помимо короткого времени перемешивания и стабильности режима течения (в том числе двухфазного), микроструктурированные смесители обладают малым внутренним объемом.

### Контролируемый синтез в однофазных потоках

Идея контроля за размерами, составом, а по возможности, структурой и свойствами синтезируемых частиц в процессах соосаждения привлекает внимание исследователей во многих странах [40-42]. Кроме того, высококачественная гомогенизация растворов на молекулярном/ионном уровне важна и при получении металлоорганических соединений, например, в реакциях гидролиза. Чаще всего при выборе модельной реакции исследователи отдают предпочтение не осложненному побочными реакциями процессу получения сульфата бария [43, 44] или карбоната кальция [45], хотя есть работы и по синтезу фосфата лантана [40].

В качестве средства для интенсивного смешения обычно используется Т-образный смеситель с лобовым столкновением двух потоков растворов, за которым следует трубчатая часть микрореактора с диаметром канала порядка 1–2 мм или менее. Изменение длины трубчатой части микрореактора, в которой происходит рост частиц, позволило регулировать время пребывания  $\tau$  (например, в работе [40] в интервале 0.0004–120 с), а значит, и контролировать размеры получаемых частиц. В указанной работе показано, что с увеличением времени пребывания медианный размер частиц  $\text{LaPO}_4$  (получаемых при смешении растворов  $\text{La}(\text{NO}_3)_3$  и  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) возрастает с 100 нм (при  $\tau = 0.0004$  с) до 1 мкм (при  $\tau = 120$  с). При этом с ростом времени пребывания уменьшается дисперсия размеров частиц. Было обнаружено, что независимо от значения pH и концентрации растворов выход  $\text{LaPO}_4$  (отношение количества лантана на выходе к количеству лантана на входе, в единицу времени) пропорционален произведению ионных концентраций  $[\text{La}^{3+}]$  и  $[\text{H}_2\text{PO}_4^-]$ . С этим же произведением коррелирует численная плотность частиц ( $\text{м}^{-3}$ ), с показателем степени 2.3 при  $[\text{La}^{3+}][\text{H}_2\text{PO}_4^-]$ . Представленные в этой работе ПЭМ частиц демонстрируют, что при  $\tau > 0.1$  с форма частиц  $\text{LaPO}_4$  приближается к сферической. Вместе с тем, прямое математическое описание кинетики нуклеации и роста авторы указанной статьи считают трудно достижимым.

Тем не менее, полученные результаты дают основание рассчитывать на достаточно обширные возможности управления процессами нуклеации и роста частиц в микрореакторах – посредством pH, концентраций реагентов, качества микросмешения, времени пребывания в каждой из зон реактора – в зоне нуклеации, в зоне роста.

Проведенный анализ работ демонстрирует существенное влияние гидродинамических условий синтеза на характеристики получаемых частиц. В частности, необходимо обеспечивать высокое качество смешения не только на макроуровне, но и на микроуровне.

В одной из недавних работ показано, что в традиционно используемом лабораторном реакторе с магнитной мешалкой качество макросмешения неудовлетворительное: при вводе струи 4M NaOH в 0.05 M раствор HCl на оси реактора образуется вращающийся шнур, при этом нейтрализация длится около 30 мин, и из-за большого градиента концентраций на нее расходуется в 3.5 раза больше щелочи, чем требуется по стехиометрии [56]. В той же работе при использовании йодид-иодатной методики показано, что индикатор качества микросмешения в реакторе с магнитной мешалкой – индекс сегрегации  $X_s$  – имеет высокое значение ( $\sim 0.5$ ), не зависящее от частоты вращения мешалки, что свидетельствует о крайне низком качестве микросмешения в этом аппарате. Для сравнения значение  $X_s$  измерено в разработанных нами микрореакторах различных типов – микрореакторах со сталкивающимися струями [57] и микрореакторах с интенсивно закрученными потоками; в указанных аппаратах оно существенно зависит от удельной скорости диссипации энергии  $\varepsilon$  и варьируется от 0.01 до 0.002. При этом в разработанных нами микрореакторах достижимы значения  $\varepsilon$  до  $10^4$  Вт/кг, а абсолютные значения потребляемой мощности не превышают 10–12 Вт [56].

Таким образом, правильно сконструированные микрореакторы способствуют концентрированию вещества и энергии в микрообъемах (порядка 1-3 мл), что обеспечивает чистоту продукта от примесей, беспрецедентно высокое качество микросмешения, короткое время пребывания – не более 1 мс (которое при необходимости может быть легко увеличено за счет дополнительных ступеней аппарата). Кроме того микрореакторы, работающие на интенсивных режимах, обладают высокой производительностью, что облегчает перевод лабораторных технологий на промышленный уровень.

В макромасштабных реакторах и других типах химических аппаратов интенсификация процессов может достигаться, в том числе, за счет использования различных физических полей и форм движения (центробежных, пульсационных), использования устройств оригинальной геометрии, способствующих увеличению полезного эффекта при снижении энергетических затрат.

В обзоре [78] представлены современные достижения (по результатам европейской конференции 2015 г. Mixing-15) в области интенсификации макросмешения – реакторы с

эксцентричным расположением перемешивающих устройств, с мешалками, имеющими фрактальную структуру, роторно-пульсационные аппараты, с изменением направления вращения рабочих частей мешалки, с орбитальным движением аппаратов, новые типы статических смесителей.

На кафедре оптимизации химической и биотехнологической аппаратуры СПбГТИ (ТУ) разработаны методы интенсификации процессов в многофазных системах (жидкость-жидкость, жидкость-газ, жидкость-твердое), позволяющие осуществлять самые разнообразные процессы – экстракцию (жидкостную и твердофазную), растворение (в том числе в условиях полной герметизации), эмульгирование, диспергирование газа в жидкости, в том числе осложненное химическими и биохимическими реакциями, формирование устойчивой пены, пропитку капиллярно-пористых тел.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 20-63-47016 (в части, касающейся синтеза наноразмерных частиц неорганических материалов)*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ramshaw C.*, The Incentive for Process Intensification. Proceedings of 1st Intl. Conf. Proc. Intensif. for Chem. Ind., 18, BHR Group, London, p. 1 (1995).
2. *Gorak A., Stankiewicz A.* Research Agenda for Process Intensification <https://www.google.com/search?q=Research+Agenda+for+Process+Intensification&oq=Research+Agenda+for+Process+Intensification&aqs=chrome..69i57j69i64.1565j0j4&sourceid=chrome&ie=UTF-8>.
3. *Stankiewicz A., Moulijn J.A.* Process Intensification: Transforming Chemical Engineering// Amer. Inst. Chem. Eng. January 2000. P. 22-34.
4. *Dautzenberg F. M., Mukherjee M.* Process Intensification Using Multifunctional Reactors// Chem. Eng. Sci., 2001, 56, 251-267.
5. *Бауэр Т., Шуберт М., Ланге Р., Абиев Р.Ш.* Интенсификация гетерогенно-каталитических газожидкостных реакций в реакторах с многоканальным монолитным катализатором // Журн. прикл. химии, 2006, 79, 1057-1066 [Т. Bauer, М. Schubert, R. Lange, R. Sh. Abiev, Russ. J. App. Chem. (Engl. Transl.). 2006. V. 79. N 7. P. 1047–1056.]
6. *Taylor G.I.* Deposition of a viscous fluid on the wall of a tube // J. Fluid Mech. 1961, 10, 161-165. <https://doi.org/10.1017/S0022112061000159>
7. *Abiev R.Sh.* Mathematical model of two-phase Taylor flow hydrodynamics for four combinations of non-Newtonian and Newtonian fluids in microchannels // Chem. Eng. Sci. 2022. V. 247. 116930. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.116930>
8. *Абиев Р. Ш.* Циркуляционный и байпасный режимы снарядного течения газожидкостной смеси в капилляре // Теорет. основы хим. технологии. 2009. Т. 43. С. 313–321 [Abiev R. Sh. Circulation and bypass modes of the slug flow of a gas-liquid mixture in capillaries // Theor. Found. Chem. Eng. 2009. V. 43. P. 298–306. <https://doi.org/10.1134/S0040579509030099>].
9. *Abiev R.Sh.* Taylor vortex center, film thickness, velocity and frequency of circulations in slugs and plugs for non-Newtonian and Newtonian fluids in two-phase Taylor flow in microchannels // Chem. Eng. Sci. 2022. V. 250. 117380. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.117380>
10. *Abiev R. Sh., Butler C., Lalanne B., Cid E., Billet A.-M.* Mass transfer characteristics and concentration field evolution for gas-liquid Taylor flow in milli channels // Chem. Eng. Sci. 2019. V. 207. P. 1331–1340. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2019.07.046>
11. *Mei M., Hébrard G., Dietrich N., Loubière K.* Gas-liquid mass transfer around Taylor bubbles flowing in a long, in-plane, spiral-shaped milli-reactor// Chem. Eng. Sci. 2020. V. 222. 115717. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.115717>
12. *Woo M., Tischer S., Deutschmann O., Wörner M.* A step toward the numerical simulation of catalytic hydrogenation of nitrobenzene in Taylor flow at practical conditions// Chem. Eng. Sci., 2021, 230, 116132; <https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.116132>
13. *Abiev R.Sh., Pavlyukova Y.N., Nesterova O.M., Svetlov S.D., Ostrovskii V.A.* Mass Transfer Intensification of 2-Methyl-5-Nitrotetrazole synthesis in Two-phase Liquid-Liquid Taylor

Flow in Microreactor // Chem. Eng. Res. & Des. 2019. V. 144. P. 444-458. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2019.01.033>

14. Popova E. A., Abiev R. Sh., Lappalainen L. A., Svetlov S. D., Andreeva T. V., Trifonov R. E., Ostrovskii V. A. Synthesis of 5-phenyltetrazole and its N-methyl derivatives in a microreactor // Chem. Biochem. Eng. Quarterly. 2014. V. 28. P. 241–246

15. Klapötke Th.M. Chemistry of High-energy Materials / Th. M. Klapotke. – Berlin, New York: Walter de Gruyter GmbH & Co. KG, 2011. 385 p. – P. 16, 85-121.

16. Klapötke Th. M., Sabaté C. M., Stierstorfer J. Neutral 5-nitrotetrazoles: easy initiation with low pollution// New J. Chem. 2009. V. 33, 136. <https://doi.org/10.1039/b812529e>

17. Bagal L.I., Pevzner M.S., Frolov A.N., Sheludyakova N.I. Heterocyclic nitro compounds. I. Synthesis of nitro derivatives of 1,2,4-triazole, 1,3,4-thiadiazole, tetrazole, 1,3,4-oxadiazole, and pyrazole by the noncatalytic replacement of the diazogroup by the nitro group // Chem. Heterocycl. Compd. 1970. N. 6. P. 240-244.

18. Spear R.J. Positional selectivity of the methylation of 5-substituted tetrazolate anions // Aust. J. Chem. 1984, V. 37. 2453–2468.

19. Green energetic materials. Ed.: Tore Brinck, Ed., John Wiley & Sons, Ltd. 2014.

20. Ostrovskii V.A., Pevzner M.S., Kofman T.P., Shcherbinin M.B., Tselinskii I.V. Energetic 1,2,4-Triazoles and Tetrazoles: Synthesis, Structure and Properties. In: Targets in Heterocyclic Systems. Chemistry and Properties/Eds.: O.A. Attanasi, D. Spinelly. Ital. Soc. Chem. 1999. V.3. P.467-526.

21. Pavlyukova Yu. N., Nesterova O.M., Ilyushin M.A., Ostrovskii V.A. Methylation of 5-nitrotetrazole sodium salt under phase-transfer catalysis conditions// Chem. Heterocycl. Compd. 2017. V. 53. N6/7. 733 –736. <http://dx.doi.org/10.1007/s10593-017-2118-5>.

22. Zhao C.-X., He L., Qiao S.Z., Middelberg A.P.J. Nanoparticle synthesis in microreactors// Chem. Eng. Sci. 2011. V. 66. P. 1463–1479. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2010.08.039>

23. Nightingale A.M., deMello J.C. Segmented Flow Reactors for Nanocrystal Synthesis // Advanced Materials. 2013. V. 25. N 13. P. 1813–1821. <http://dx.doi.org/10.1002/adma.201203252>

24. Mbwanche R.C., Matyushkin L.B., Ryzhov O.A., Aleksandrova O.A., Moshnikov V.A. Synthesis of quantum dot nanocrystals and plasmonic nanoparticles using a segmented flow reactor// Optics and Spectroscopy. 2017. V. 122. P. 48–51.

25. Luo L., Yang M., Chen G. Continuous synthesis of TiO<sub>2</sub>-supported noble metal nanoparticles and their application in ammonia borane hydrolysis // Chem. Eng. Sci. 2022. V. 251. 117479. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2022.117479>

26. Wu H., Cheng Y., Fan Y., Lu X., Li L., Liu B., Li B., Lu S. Metal-catalyzed hydrolysis of ammonia borane: Mechanism, catalysts, and challenges // Int. J. Hydr. Energy. 2020. V. 45. N. 55. P. 30325-30340. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.08.131>

27. Sanyal U., Demirci U.B., Jagirdar B.R., Miele P. Hydrolysis of ammonia borane as a hydrogen source: fundamental issues and potential solutions towards implementation // ChemSusChem. 2011. V. 4. N. 12. P. 1731-1739. <https://doi.org/10.1002/cssc.201100318>

28. Liu H., Vandu C. O., Krishna R. Hydrodynamics of Taylor Flow in Vertical Capillaries: Flow Regimes, Bubble Rise Velocity, Liquid Slug Length, and Pressure Drop // Indust. & Eng. Chem. Res. 2005. V. 44. N. 14. P. 4884–4897. <https://doi.org/10.1021/ie049307n>

29. Falconi C. J., Lehrenfeld C., Marschall H., Meyer C., Abiev R., Bothe D., Wörner M. Numerical and experimental analysis of local flow phenomena in laminar Taylor flow in a square mini-channel // Physics of Fluids. 2016. V. 28. N. 1, 012109. <https://doi.org/10.1063/1.4939498>

30. Абиев Р.Ш., Лаврецов И.В. Гидродинамика снарядного течения газожидкостной системы в капиллярах: сравнение теории и эксперимента// Теор. основы хим. технол. 2011. Т. 45. С. 251–263 [Abiev R.S., Lavretsov I.V. Hydrodynamics of Gas–Liquid Slug Flow in Capillaries: Comparing Theory and Experiment// Theor. Found. Chem. Eng. 2011. V. 45. P. 235–247].

31. Abiev R. Sh. Gas-liquid and gas-liquid-solid mass transfer model for Taylor flow in micro (milli) channels: A Theoretical approach and experimental proof // Chem. Eng. J. Advances. 2020. V. 4. ID 100065. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.100065>

32. *Abiev R.S., Lavretsov I.V.* Hydrodynamics and Mass transfer of Taylor flow of Gas-Liquid Systems in Micro Channels: Theory and Experiment // *Chem. Eng. J.* 2011. V. 176-177. P. 57-64 <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.03.107>
33. *Hessel V., Löwe H., Schönfeld F.* Micromixers—a review on passive and active mixing principles// *Chem. Eng. Sci.* 2005. V. 60. P. 2479 – 2501. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2004.11.033>
34. *Kawase M., Suzuki T., Miura K.* Growth mechanism of lanthanum phosphate particles by continuous precipitation // *Chem. Eng. Sci.* 2007. V. 62. P. 4875–4879. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2007.02.032>
35. *Marchisio D.L., Barresi A.A., Garbero M.* Nucleation, growth, and agglomeration in barium sulfate turbulent precipitation // *AIChE J.* 2002. V. 48. N. 9. P. 2039–2050. <https://doi.org/10.1002/aic.690480917>
36. *Marchisio D.L., Rivautella L., Barresi A.A.* Design and scale-up of chemical reactors for nanoparticle precipitation // *AIChE J.* 2006. V. 52. P. 1877–1887. <https://doi.org/10.1002/aic.10786>
37. *Baldyga J., Orciuch W.* Closure problem for precipitation// *Trans. Inst. Chem. Engineers.* 1997. V. 75A. P. 160–170.
38. *Schwarzer H.-C., Peukert W.* Combined Experimental/Numerical Study on the Precipitation of Nanoparticles// *AIChE J.* 2004. V. 50. P. 3234–3247. <https://doi.org/10.1002/aic.10277>
39. *Vacassy R., Lemaître J., Hofmann H., Gerlings J.H.* Calcium carbonate precipitation using new segmented flow tubular reactor// *AIChE J.* 2000. V. 46. P. 1241–1252.
40. *Абиев Р.Ш., Макушева И.В.* Влияние макро- и микросмешения на процессы растворного синтеза частиц оксидных материалов в микроаппаратах с интенсивно закрученными потоками// *Теор. основы хим. технол.* 2022. Т. 56. С. 137–147 [*Abiev R. Sh., Makusheva I. V.* Effect of Macro- and Micromixing on Processes Involved in Solution Synthesis of Oxide Particles in High-Swirl Microreactors// *Theor Found Chem Eng.* 2022. V. 56. P. 141–151. <https://doi.org/10.1134/S0040579522020014>]
41. *Абиев Р.Ш., Сироткин А.А.* О влиянии гидродинамических условий на микросмешение в микрореакторах со сталкивающимися струями// *Теор. основы хим. технол.* 2022. Т. 56. С. 11–25 [*Abiev R.S., Sirotkin A.A.* Effect of Hydrodynamic Conditions on Micromixing in Impinging-Jets Microreactors// *Theor Found Chem Eng.* 2022. V. 56. P. 9–22. <https://doi.org/10.1134/S0040579522010018>]
42. *Барабаш В.М., Абиев Р.Ш., Кулов Н.Н.* Обзор работ по теории и практике перемешивания // *Теор. основы хим. технол.* 2018. Т. 52. С. 367–383. <https://doi.org/10.1134/S0040357118040024> [*Barabash V.M., Abiev R.S., Kulov N.N.* Theory and Practice of Mixing: A Review// *Theor Found Chem Eng.* 2018. V. 52P. 473–487. <https://doi.org/10.1134/S004057951804036X>]

## ЭКСТРАГИРОВАНИЕ ЦЕЛЕВЫХ КОМПОНЕНТОВ ИЗ ТВЕРДОЙ ФАЗЫ EXTRACTION OF TARGET COMPONENTS FROM SOLID PHASE

Станислав Павлович Рудобашта  
Stanislav P. Rudobashta

*Российский государственный аграрный университет – МСХА имени  
К.А. Тимирязева, Россия, Москва  
Russian state agrarian University – MAA after K.A. Timiryazev, Russia, Moscow  
(e-mail: rudobashta@mail.ru)*

*Аннотация:* Проанализированы вопросы математического моделирования рассматриваемого процесса. Математические модели непрерывно развиваются, в новых работах учитываются все новые и новые аспекты, существенные для процесса. Рассмотрены современные высокоэффективные методы интенсификации массообмена в системе «твердое - жидкость» - при ее обработке в роторно-импульсных аппаратах и электроразрядное экстрагирование, а также вопросы экологической чистоты процесса экстрагирования применительно к плодово-овощному сырью.

*Abstract:* The questions of mathematical modeling of the considered process are analyzed. Mathematical models are constantly evolving, new works take into account more and more new aspects that are essential for the process. Modern highly efficient methods of mass transfer intensification in the "solid-liquid" system are considered - during its processing in rotary-pulse apparatuses and electric discharge extraction, as well as issues of environmental cleanliness of the extraction process in relation to fruit and vegetable raw materials.

*Ключевые слова:* экстрагирование, система «твердая фаза-жидкость», математическое моделирование, интенсификация, экологичность.

*Keywords:* extraction, "solid-liquid" system, mathematical modeling, intensification, environmental friendliness.

**Введение.** Экстрагирование из твердой фазы является одним из основных массообменных процессов (наряду с процессами сушки и адсорбции). Его анализу посвящено много работ. Данный симпозиум посвящен памяти чл.-корр. АН СССР П.Г. Романкова, поэтому отметим, прежде всего, его классическую монографию с М.И. Курочкиной [1]. Экстрагированию из твердой фазы посвящены также монографии [2-4]. В работах по экстрагированию целевых компонентов из твердой фазы рассматриваются вопросы аппаратурно-технологического оформления этого процесса, его математического моделирования, интенсификации, энерго-и ресурсосбережения, экологической безопасности.

**Цель данной работы:** проанализировать современное состояние исследований процесса экстрагирования целевых компонентов из твердой фазы.

**Математическое моделирование процесса.** Целью математического моделирования процесса экстрагирования является, как правило, кинетический расчет аппарата, который заключается в определении продолжительности процесса  $\tau$ , а также численное исследование влияния различных параметров на кинетику процесса. При непрерывной организации процесса по времени  $\tau$  определяют рабочий объем аппарата  $V_p$ , м<sup>3</sup>, обеспечивающий заданную его производительность

$$V_p = \frac{G \tau}{\rho(1 - \psi)}, \quad (1)$$

где  $G$  - расход твердой фазы, кг/с;  $\rho$  - плотность материала твердой фазы, кг/м<sup>3</sup>;  $\psi$  - доля свободного объема аппарата, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $\tau$  – необходимое время пребывания материала в аппарате, с.

Для определения времени  $\tau$  используют различные методы, начиная от чисто экспериментального его определения, и кончая современными методами его расчета по математическим моделям. Для расчета времени  $\tau$  применяют как основное уравнение массопередачи, что характерно для ранних работ по экстрагированию (см., например, [1]), а также для случаев, когда частицы твердой фазы, из которых происходит экстрагирование, имеют сложную геометрическую форму, плохо уподобляемую одной из классических форм: пластина, бесконечный или ограниченный цилиндр, шар, прямоугольный параллелепипед. В том же случае, когда частицы твердой фазы имеют эти формы, расчет предпочитают проводить на основе решений задачи диффузии для единичной частицы с использованием эффективного коэффициента диффузии распределяемого вещества в твердой фазе, с последующим обобщением результата расчета на весь ансамбль частиц, находящихся в аппарате. Этот подход описан в классических работах Г.А. Аксельруда [2], в которых получены аналитические решения задачи массообмена для замкнутого процесса и непрерывных процессов для схем прямого и противотока.

При расчете времени экстрагирования по решению дифференциального уравнения диффузии необходимо знание эффективного коэффициента диффузии  $D_e$ , с помощью которого описывают перенос распределяемого вещества в твердой фазе. Материал твердой фазы может быть непористым (например, при экстрагировании низкомолекулярных соединений из гранул непористых полимеров), пористым (обычно, капиллярно-пористым) и иметь клеточное строение – в материалах растительного и животного происхождения.

Для пористых материалов коэффициент  $D_e$  может быть представлен в виде

$$D_e = \frac{D\varepsilon}{\gamma^2}, \quad (2)$$

где  $D$  – коэффициент диффузии в гомогенной среде, м<sup>2</sup>/с;  $\varepsilon$  – пористость частицы, учитывающая уменьшение площади ее сечения, свободного для диффузии, (м<sup>3</sup> пор)/(м<sup>3</sup> частицы);  $\gamma$  – коэффициент извилистости, учитывающий извилистость поровых каналов (вторая степень этого коэффициента обусловлена тем, что один сомножитель  $\gamma$  учитывает удлинение пути диффузии, а второй сомножитель  $\gamma$  – несовпадение направления диффузии с рассматриваемой координатой).

Процесс переноса вещества в твердой фазе при экстрагировании проще, чем при сушке и адсорбции, т.к. осуществляется только путем молекулярной диффузии, и, кроме того, в данном случае отсутствует наложение температурного поля, поэтому нет необходимости его учета. Эффективный коэффициент диффузии  $D_e$  при экстрагировании в ходе процесса, проводимого при постоянных параметрах внешней фазы, в общем случае изменяется, что отмечено в ряде работ [5], это объясняют влиянием на него термодинамических параметров [5] (т.к. истинной движущей силой массопереноса является не разность концентраций, а разность химических потенциалов). Трудности экспериментального характера не позволили в большинстве случаев при исследовании процессов экстрагирования получить четкие концентрационные зависимости  $D_e = f(C)$ , где  $C$  – концентрация распределяемого вещества в твердой фазе, поэтому кинетический расчет проводят, как правило, при постоянном значении этого коэффициента.

При экстрагировании веществ из материалов растительного происхождения, имеющих клеточное строение, описание внутреннего массопереноса на основе уравнения молекулярной диффузии Фика

$$i = -D_e \frac{\partial C}{\partial n}, \quad (3)$$

где  $i$  – плотность потока распределяемого вещества, кг/(м<sup>2</sup> с);  $C$  – концентрация, кг/м<sup>3</sup>;  $D_e$  – эффективный коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/с;  $n$  – нормаль к изоконцентрационной поверхности, м) становится условным, т.к. распределяемому веществу в процессе его перемещения из вакуоли к поверхности частицы приходится последовательно преодолевать различные участки структуры клетки. Оно диффундирует последовательно [6]: в среде вакуоли к ее стенке, через эту стенку в цитоплазму, в среде цитоплазмы, через мембранную оболочку клетки, в межклеточной среде к его покровной ткани и через покровную ткань в экстрагент. Встречающаяся на его пути твердая фаза создает дополнительное сопротивление диффузии. Таким образом, внутренний массоперенос распределяемого вещества в материале с клеточной структурой только условно может быть описан уравнением молекулярной диффузии Фика для однородной среды с некоторым эффективным коэффициентом диффузии  $D_e$ . Однако, в целях упрощения математического описания применяют, как правило, именно его.

Для расчета кинетики экстрагирования на основе решений дифференциального уравнения диффузии необходимы данные по коэффициенту диффузии  $D_e$ . Отсутствие миниатюрных датчиков локальных концентраций затрудняет экспериментальное определение этого коэффициента. Поэтому прорывным следует считать метод определения концентрационной зависимости коэффициента диффузии (коэффициента массопроводности) из кривой кинетики, снятой в условиях отсутствия внешнего диффузионного сопротивления вокруг частицы [7]. На основе этого метода были определены концентрационные зависимости различных материалов в процессах сушки, адсорбции и экстрагирования [5].

При рассмотрении внутреннего массопереноса при экстрагировании концентрацию распределяемого вещества можно относить к единице объема внутрипоровой жидкости - если частицы имеют пористое строение. Именно так это сделано у Г.А. Аксельруда [2], при этом принято, что стенки пор не обладают сорбирующим эффектом, а можно относить к единице объема твердой фазы. Последнее является единственно возможным при экстрагировании целевых компонентов из непористых материалов (полимеров). При этом уравнение, описывающее внутренний массоперенос принимает вид

$$i = -k \rho_0 \frac{\partial u}{\partial n}, \quad (4)$$

где  $k$  – коэффициент массопереноса, называемый в химической технологии коэффициентом массопроводности [8], м<sup>2</sup>/с;  $u$  – относительная локальная массовая доля распределяемого вещества, кг/(кг тв. фазы);  $\rho_0$  – плотность абсолютно сухого материала, кг/м<sup>3</sup>.

Выбранный способ отнесения концентрации распределяемого вещества в твердой фазе влияет на запись граничного условия массообмена 3-го рода [5] при формулировке задачи диффузии и на выражение числа Био массообменного. При отнесении концентрации распределяемого вещества к единице объема внутрипоровой жидкости и отсутствию сорбирующего эффекта стенок пор решения задач диффузии содержат число Био массообменного в его обычной форме:  $Bi_m = \beta R / D_e$ , в ином случае появляется модифицированное число Био массообменного. Граничное условие массообмена третьего рода в этом случае для одномерной задачи имеет вид

$$-D_e \left[ \frac{\partial C(x, \tau)}{\partial x} \right]_{x=R} = \beta^* (C_n - C_p), \quad x = R, \tau > 0, \quad (5)$$

где  $C$  – локальная концентрация извлекаемого вещества в твердой фазе, кг/м<sup>3</sup>;  $\beta^* = \beta / A_p$  – модифицированный коэффициент массоотдачи, м/с;  $\beta$  – истинный коэффициент массоотдачи, м/с;  $A_p = C / C_c$  – коэффициент распределения функции концентрационного фазового равновесия;  $C_n$  – концентрация распределяемого вещества в твердой фазе у поверхности частицы, кг/м<sup>3</sup>;  $C_p$  – равновесная концентрация извлекаемого вещества во внешней фазе, которая находится по концентрации  $C_c$ , кг/м<sup>3</sup>;  $C_c$  – концентрация распределяемого вещества в ядре внешней фазы, кг/м<sup>3</sup>;  $R$  – радиус цилиндра или шара, половина толщины пластины, м;

Здесь принято, что  $C = A_p C_c$  где  $A_p = \text{const}$  (линейная равновесная зависимость). Запись граничного условия в форме уравнения (5) необходима для перехода при решении задачи от значений концентраций во внешней фазе к концентрациям внутри тела, поскольку они разные, но связаны через равновесную зависимость. При переходе к безразмерным переменным из уравнения (5) следует модифицированное число Био массообменного:  $Bi_m = \beta^* R/D_e$ .

При расчете кинетики экстрагирования целевых компонентов из пористых материалов на основе решения дифференциального уравнения диффузии используют обычно указанные выше решения Г.А. Аксельруда, учитывающие изменение концентрации распределяемого вещества в ходе процесса. Отметим, что независимо от него эти решения были получены также К.Н. Белоноговым [9].

Для общего случая (при экстрагировании веществ из пористых и непористых материалов, для любых схем массопередачи, при изменении параметров процесса в ходе процесса, при учете зависимости коэффициента массопроводности от концентрации) для расчета кинетики экстрагирования можно рекомендовать зональный метод [10]. Он основан на решении дифференциального уравнения массопроводности (диффузии) при постоянных параметрах внешней фазы. В соответствии с этим методом весь диапазон изменения концентрации распределяемого вещества в твердой фазе разбивается на ряд концентрационных зон, для каждой из которых рассчитывают время протекания процесса в этой зоне  $\tau_i$ . Общее необходимое время пребывания материала в аппарате равно  $\tau = \sum_{i=1}^n \tau_i$ , где

$n$  – число выбранных концентрационных зон. Время  $\tau_i$  рассчитывают по решению задачи массопроводности с одним членом ряда, из которого для частиц в форме пластины, цилиндра и шара следует [5]

$$\tau_i = \frac{R^2}{\mu_i^2 k_i} \ln \frac{B_i^*}{\bar{E}_i}, \quad (6)$$

где  $R$  – половина толщины пластины, радиус цилиндра или шара, м;  $k_i$  – значение коэффициента массопроводности в  $i$ -той концентрационной зоне,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\bar{E}_i = \frac{\bar{u}_{k,i} - u_{p,i}}{u_{n,i} - u_{p,i}}$  – относительное среднеобъемное массосодержание частицы в  $i$ -той концентрационной зоне;  $u_{n,i}, \bar{u}_{k,i}, u_{p,i}$  – начальное, конечное и равновесное массосодержание распределяемого вещества в  $i$ -той концентрационной зоне,  $\text{кг}/(\text{кг тв. фазы})$ ;  $\mu_i$  – первый положительный корень характеристического уравнения решения задачи [5].

Коэффициент  $B_i^*$  для первой концентрационной зоны представляет собой первый предэкспоненциальный множитель в решениях, которые предполагают равномерное начальное массосодержание:  $B_1$ . Во второй и последующих зонах это распределение уже не является равномерным, а является таким, которое сформировалось в конце первой зоны. В [5] показано, что для второй и последующих зон  $B_i^* = B_1 \cdot \gamma_i$ , где для коэффициента  $\gamma_i$  в [5] получены выражения для их расчета. Практика наших расчетов показывает, что для любой концентрационной зоны можно принимать  $B_i^* = 1$ , Это согласуется с результатами анализа других авторов. С физической точки зрения принятие  $B_i^* = 1$  для первой зоны можно объяснить тем, что фактическое начальное распределение концентраций в частице является не равномерным, а в ней до начала процесса массообмена в аппарате уже сформировался определенный концентрационный профиль. Поэтому интервалы массосодержаний в зонах можно принимать произвольными, а не в соответствии с наступлением регулярного режима.

Следствием принятия условия  $B_i^* = 1$  является также то, что при этом появляется возможность расчета коэффициента массопроводности (диффузии) из кривой кинетики, снятой в условиях, когда внешнее диффузионное сопротивление не равно нулю [11] (модифицированный зональный метод). Работоспособность этого метода проверена при экстрагировании загрязнителей из текстильных тканей, при этом появляется возможность определить также коэффициент массоотдачи.

Экстрагирование целевых компонентов из твердой фазы находит применение в различных отраслях промышленности. Для его проведения используют различные технологические схемы, в том числе полунепрерывный процесс: периодический по твердой и непрерывный по жидкой фазе. Его преимуществом является более полное, чем в замкнутом процессе, извлечение целевого компонента из твердой фазы. Данное обстоятельство имеет значение, когда целью процесса является не получение экстракта максимальной концентрации, а максимальное извлечение вещества из твердой фазы, как это, например, имеет место в технологии отмытки текстильных тканей от различных загрязнителей (красителей, замасливателей и т.д.). Нами были получены аналитические решения, описывающие этот процесс для тел разной формы – пластины [12], цилиндра - [13], шара - [14].

При интенсивном гидродинамическом режиме массообмена в экстракционных аппаратах для систем с твердой фазой может изменяться механизм переноса вещества в пористых частицах: в крупных порах происходит конвективный механизм массопереноса, а в тонких порах массоперенос осуществляется молекулярной диффузией [15, 16]. Эта схема внутреннего массопереноса в [15] названа «математической моделью с бидисперсной структурой», а в [16] - «диффузионно-конвективной моделью».

В [15] частица твердого вещества, подвергаемого экстрагированию, представлена двумерной плоской моделью, в которой присутствуют две области: 1) пористый блок - область тонких плоских пор, в которых происходит молекулярная диффузия распределяемого вещества вдоль координаты «у» к крупным транспортным порам, 2) плоские транспортные каналы, по которым распределяемое вещество, поступившее из тонких пор, путем конвективной диффузии перемещается вдоль координаты «х» к поверхности частицы. В [15] получено численное решение рассматриваемой задачи при равномерном начальном распределении концентрации в областях 1 и 2, при равенстве ее значений и потоков вещества на границе блоков и при постоянной концентрации  $C_2$  у торцов транспортного канала длиной  $L$ : Эта модель была использована для численного моделирования процесса экстрагирования [15].

В [16] различают три стадии процесса: 1) проникновение экстрагента внутрь пористой частицы (гидравлическая стадия), 2) диффузия целевого компонента из капиллярных пор в транспортные поры и далее по ним к поверхности раздела фаз (диффузионно-конвективная стадия), 3) диффузионная стадия, скорость процесса на которой контролируется молекулярной диффузией целевого компонента из глубины пористой частицы к транспортным порам. В этой модели расчет основных характеристик кинетики процесса экстрагирования основан на аналитическом определении длительностей отдельных стадий процесса. Этот расчет вызывает сложности, так как требует знания длины и толщины капилляров, площади поверхности пор.

Проведенный анализ показывает, что математическое моделирование процесса экстрагирования веществ из твердой фазы развивается, в нем учитываются все новые и новые аспекты, существенные для процесса.

**Интенсификация массообмена.** Для интенсификации массообмена при экстрагировании из твердой фазы используют такие приемы, как: уменьшение размеров частиц, повышение температуры системы, активизация гидродинамического режима, использование схем процесса с пониженной концентрацией распределяемого вещества во внешней фазе, улучшение гидродинамической структуры потока в непрерывно действующих аппаратах путем приближения их по гидродинамической структуре к аппарату идеального вытеснения.

Одним из эффективных устройств одновременного проведения процессов измельчения твердых частиц, гомогенизации и экстрагирования в активной рабочей зоне является роторный импульсный аппарат (РИА). Он позволяет получать стабильные, тонкодисперсные суспензии и интенсифицировать процесс извлечения целевых веществ из твердых частиц [6]. Обрабатываемая среда подвергается в РИА многофакторному воздействию импульсного характера, которое вызывают гидродинамические вихри, импульсы давления, развитую кавитацию [6]. Совокупность механического, гидродинамического и акустического воздействий на систему в РИА существенно интенсифицирует процессы диспергирования частиц и извлечения целевого вещества из частиц твердой фазы в жидкость. Это направление интенсификации развивается в работах М.А. Промтова. Коэффициент массоотдачи  $\beta$  (м/с) для процесса экстрагирования веществ в аппарате РИА может быть вычислен по следующему эмпирическому уравнению [6]

$$\beta = 0,267 \cdot \left( \varepsilon^* \cdot \frac{\mu}{\rho} \right)^{0,25} \cdot Sc^{-0,75}, \quad (7)$$

где  $\mu$  – динамическая вязкость жидкости, Па·с;  $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $Sc = \nu/D$  – число Шмидта;  $\nu$  – кинематическая вязкость жидкости, м<sup>2</sup>/с;  $D$  – коэффициент диффузии распределяемого вещества в жидкости, м<sup>2</sup>/с;  $\varepsilon^* = (N + N_n)/m$  – удельная мощность (Вт/кг), вводимая в систему в РИА;  $N$  – затраты мощности на вращение ротора РИА, Вт;  $N_n$  – затраты мощности, на подачу жидкости насосом, Вт.

Аппаратом активного аэродинамического воздействия на систему, аналогичному по принципу воздействия аппарату РИА, является аппарат дискретно-импульсного воздействия ДИВЭ, технологические исследования по которому приведены в [17].

Другим высокоэффективным способом интенсификации процесса экстрагирования в системе «твердая фаза-жидкость» является генерирование в системе высоковольтных электрических разрядов (электроразрядное экстрагирование) [18]. Исследования по этому направлению активно проводит В.Т. Казуб, многие результаты которых приведены в [18]. Электрический разряд в жидкости вызывает скачкообразный рост температуры канала, образование парогазовой полости и ее расширение с огромной скоростью, что приводит к формированию импульса давления (гидравлический удар) [18]. При расширении полости в жидкости образуются разрывы сплошности, развивается импульсная кавитация. При отражении от стенок аппарата ударные волны интерферируют, создавая дополнительную турбулентность. Электрический разряд в жидкости в начальной стадии своего развития сопровождается возникновением и схлопыванием кавитационных пузырьков, а в завершающей стадии – к возникновению пульсирующей парогазовой полости, в которую вырождается канал разряда. Формируемые при этом волны сжатия-разрежения приводят к значительной турбулизации диффузионного пограничного слоя вокруг каждой частицы твердой фазы и, как следствие, – к резкой интенсификации процесса, длительность которого многократно сокращается.

**Экологически чистая технология экстрагирования.** Технология экстрагирования должна быть экологически чистой как по отношению к внешней среде, так и в отношении экстрагентов, которые должны быть безопасны для применения. В химико-фармацевтической и пищевой промышленности очень часто экстрагируют целевые компоненты из растительного сырья (фруктов, ягод, листьев, стеблей и корней растений). Примером экологически чистого экстрагента может служить вода, используемая, в частности, в свеклосахарном производстве при извлечении сахара из свекловичной стружки в диффузионном аппарате. Ярким примером экологически чистого экстрагента является диоксид углерода в технологии CO<sub>2</sub>-экстрагирования [19]. Технология CO<sub>2</sub>-экстрагирования успешно развивается на протяжении последних трех десятков лет Г.И. Касьяновым. Изящность этой технологии заключается в том, при чем высоком давлении в аппарате, при котором диоксид углерода находится в нем в жидкофазном состоянии (критические параметры CO<sub>2</sub> равны:  $t_{кр} = 31,06^\circ\text{C}$ ,  $p_{кр} = 73,834$  бар), осуществляется экстрагирование

целевых компонентов из плодо-овощного сырья. После этого давление в аппарате сбрасывается, диоксид углерода становится газообразным и происходит его десорбция из системы. Напомним, что диоксид углерода является экологически чистым веществом, широко применяемым в пищевой технологии.

#### **Заключение.**

1. Выполнен анализ работ по математическому моделированию процесса экстрагирования веществ из твердой фазы – как на основе классических работ, так и работ последнего времени, который показывает, что оно непрерывно развивается, разрабатываются модели, в которых учитываются новые аспекты, существенные для процесса.

2. Важным направлением работ по экстрагированию из твердой фазы является его интенсификация, к современным эффективным методам интенсификации относятся обработка системы «твердое-жидкость» в роторно-импульсных аппаратах и электроразрядное экстрагирование.

3. Большое практическое значение имеет применение экологически чистых технологий экстрагирования, применительно к плодо-овощному сырью такой технологией является CO<sub>2</sub>-экстрагирование.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Романков П.Г., Курочкина М.И. Экстрагирование из твердых материалов. Л.: Химия, 1983. 256 с.

2. Аксельруд Г.А. Массообмен в системе твердое тело-жидкость. Львов: Изд. Львовского университета, 1970. 188 с.

3. Аксельруд Г.А., Лысянский В.М. Экстрагирование (система твердое тело—жидкость). Л.: Химия, 1974. 256 с.

4. Лысянский В.М., Гребенюк С.М. Экстрагирование в пищевой промышленности. М.: Агропромиздат, 1987. 187 с.

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

6. Промтов М.А., Рудобашта С.П. Экстрагирование гуминовых и фульвовых кислот из гуматосодержащего сырья в роторном импульсном аппарате. Издательство ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2022. 124 с.

7. Очнев Э. Н. и др. Зональный метод определения зависимости коэффициента массопроводности от концентрации // Теоретические основы химической технологии. – 1975. – Т. 9. – №. 4. – С. 491-495.

8. Плановский А. Н., Николаев П. И. Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии. Учебник для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Химия. 1987. 496 с.

9. Белоногов К. Н. В кн.: Физико-химические основы процессов фибрования и выщелачивания в производстве фибры. Л.: Госхимиздат. 1958. С.105.

10. Рудобашта С.П., Плановский А.Н., Очнев Э.Н.. Зональный метод расчета непрерывнодействующих массообменных аппаратов для систем с твердой фазой // Теор. основы хим. технол. 1974. Т. VIII. № 1. С. 22.

11. Рудобашта С.П., Кошелева М.К. Определение коэффициентов массоотдачи и массопроводности из кривых кинетики // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2015. № 6 (360). С. 175.

12. Рудобашта С. П., Кошелева М. К., Карташов Э. М. Математическое моделирование процесса экстрагирования целевого компонента из тел пластинчатой формы в полунепрерывном процессе // Теор. основы хим. технол. 2018. Т. 52. № 1. С. 53.

13. Рудобашта С.П., Кошелева М.К., Карташов Э.М. Математическое моделирование процесса экстрагирования целевого компонента из тел цилиндрической формы в полунепрерывном процессе // Инж.- физ. журнал. 2016. Т. 89. № 3. С. 595.

14. Рудобашта С. П., Кошелева М. К., Карташов Э. М. Моделирование экстрагирования целевого компонента из тел сферической формы в полунепрерывном процессе // Инж.-физ. ж. 2017. Т. 90, № 4. С. 841.

15. Абиев Р. Ш., Островский Г.М. Моделирование процесса экстрагирования из капиллярно-пористой частицы с бидисперсной структурой // Теор. основы хим. технол. 2001. Т. 35. № 3. С. 270.

16. Иванов Е.В. Экстрагирование из волокнистых пористых материалов. С.-Петербург. Санкт-Петербургская государственная химико-фармацевтическая академии» Росздрава. 2008. Дисс...докт. техн. наук. 336 с.

17. Долинский А.А., Басок Б.И. и др. Дискретно-импульсный ввод энергии в теплотехнологиях. Киев. ИТТФ НАН Украины. 1996. 208 с.

18. Рудобашта С. П., Казуб В.Т. Электроразрядное экстрагирование. М.: ИКЦ «Колос-с». 2022. 261 с.

19. Касьянов Г.И. Технологические основы CO<sub>2</sub>-обработки растительного сырья. М.: Россельхозакадемия. 1994. 132 с.

УДК 504.064.4: 658.567

DOI: 10.37816/eeste-2024-p-97-104

**ИННОВАЦИОННЫЕ ЭНЕРГОРЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ПРОЦЕССЫ  
УТИЛИЗАЦИИ МЕТАЛЛСОДЕРЖАЩИХ ГАЛЬВАНОШЛАМОВ ПРИ  
ИЗГОТОВЛЕНИИ ПРОМЫШЛЕННОЙ ПРОДУКЦИИ**  
**INNOVATIVE ENERGY RESOURCE SAVING PROCESSES FOR RECYCLING METAL-  
CONTAINING GALVANO SLUDGES IN THE MANUFACTURE  
OF INDUSTRIAL PRODUCTS**

**Любовь Николаевна Ольшанская**  
**Lyubov N. Olshanskaya**

*Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,  
Россия, Саратов*  
*Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Russia, Saratov*  
*(email: ecos123@mail.ru)*

*Аннотация:* Рассмотрены экологические проблемы образования и накопления гальванических шламов (ГШ), которые, загрязняя воздух, почвы, поверхностные и подземные воды создают серьезную опасность для окружающей среды и здоровья населения. Предложены инновационные способы их переработки и утилизации в пигменты–наполнители для изготовления красок; извлечение металлов; создание магнитосорбентов для удаления нефтезагрязнений; получение полиоксидных катализаторов и др.

*Abstract:* The environmental problems of the formation and accumulation of galvanic sludge (GS), which, by polluting the air, soil, surface and underground waters, pose a serious danger to the environment and public health are considered. Innovative methods for their processing and utilization into filler pigments for the manufacture of paints are proposed; metal extraction; creation of magnetosorbents for removing oil contaminants; obtaining polyoxide catalysts, etc.

*Ключевые слова:* гальваношламы, пигменты наполнители, краски (цинковые белила, железный сурик), металлический никель, гидроксид никеля, катализаторы.

*Key words:* galvanic sludge, filler pigments, paints (zinc white, red lead), metallic nickel, nickel hydroxide, catalysts.

Экономика большинства стран базируется на использовании различных природных ресурсов, мировое потребление которых в настоящее время возросло настолько, что стало соизмеримо с их запасами. Продукция, производимая для обеспечения жизнедеятельности, в конечном итоге переходит в категорию отходов, зачастую уже после разового использования [1-3]. Попадая на свалки или ландшафты, отходы загрязняют биосферные комплексы: воздух, почвы, поверхностные и подземные воды, оказывая отрицательное воздействие на окружающую природную среду и здоровье человека. Вместе с этим, они зачастую содержат ценные компоненты, которые могут быть востребованы для получения продуктов и товаров, имеющих народно - хозяйственное значение. Поэтому одной из наиболее актуальных проблем, является рациональное управление отходами путем внедрения малоотходных и безотходных технологий, применения инновационных способов переработки отходов. Без этого в настоящее время существует большая вероятность превращения планеты Земля в громадную свалку.

Известно, что безотходные технологии создаются, как правило, в странах, где существует дефицит природных ресурсов. Например, в странах Прибалтики, Японии, Финляндия и ряде других, имеется дефицит металлических руд, нефти, газа. Там разработаны и внедрены в производство установки и линии утилизации отходов металлической стружки и пыли с получением абсолютно чистого сырья, что одновременно позволяет повысить безопасность операций. Например, в Финляндии, перерабатывается около 40 тыс. тонн металлоотходов в год. В России, где имеется огромное количество металлургических и

металлообрабатывающих производств, можно возвращать в оборот миллионы тонн отходов черных и цветных металлов, получая при этом прибыль и экономя природные ресурсы. Это особенно актуально, особенно с учетом того, что в нашей стране 90 % от общего количества отходов захораниваются на свалках и полигонах [3] (рис. 1).



**Рисунок 9** — Основные направления утилизации отходов по странам мира (в % к общему количеству отходов) [3].

Одним из источников загрязнения окружающей среды вредными веществами, и в первую очередь тяжелыми металлами, являются сточные воды гальванических производств. Гальванические покрытия используются практически во всех отраслях промышленности. В РФ по оценке специалистов сегодня существует около 7000 гальванических цехов и участков, производств печатных плат и электронной техники (только в Москве их более 300). Гальваническое производство является одним из крупных потребителей цветных металлов и достаточно дорогих химических реактивов. Оно потребляет не менее 15 % никеля, 50 % цинка, 70 % меди, производимых в нашей стране. Ежегодно только при промывке изделий после гальвано химических покрытий из рабочих ванн выносятся не менее 3300 т цинка, 2400 т никеля, 2500 т меди, десятки тысяч тонн других металлов, кислот и щелочей [4]. Проведенные в России исследования составов различных накопленных гальваношламов (ГШ) показали, что в них содержится огромное количество дефицитных ценных цветных металлов (~ 30 % Cr, Ni, Fe, Zn и др.) [3, 4]. Это послужило началом процессов их переработки и утилизации.

Экологическая опасность воздействия ГШ на окружающую среду и здоровье населения, требует утилизировать их так, чтобы происходило обезвреживание тяжелых металлов (перевод в слаборастворимое или нерастворимое состояние). После чего рекомендуется их извлечение для последующего применения. ГШ относятся к экологически опасным отходам, что и определяло направления их применения в качестве компонентов стройматериалов, керамики, асфальтовых смесей и др. [4-6]. Это приводит к безвозвратным потерям дорогостоящих компонентов ГШ - тяжелых и цветных металлов. Их суммарная годовая стоимость по оценкам составляет десятки миллионов долларов США.

Торги, проводимые на Лондонской и других биржах, показывают, что цены, особенно на цветные металлы, в течение последних лет неуклонно растут. Извлечение металлов из гальваноотходов могут решить проблему их дефицита, уменьшить использование природных ресурсов и сократить значительные расходы на изыскание, добычу и транспортирование руд. Учитывая, что соединения большинства металлов в земной коре, за исключением алюминия, железа, кальция, натрия, калия и магния, составляют десятые, тысячные и менее доли процента, использование ГШ для получения чистых металлов, их соединений и последующее применение в различных отраслях народного хозяйства перспективно [4 - 8].

На сегодняшний день, на территории России, к сожалению, отсутствуют объекты по использованию и обезвреживанию гальванических отходов. В соответствии с действующими нормативно-правовыми актами захоронение гальванических отходов на полигонах запрещается. В связи с этим, единственным из возможных методов обращения с образующимися у предприятий гальваническими отходами, остается их передача на специализированные объекты с целью длительного хранения. (ПИСЬМО от 2 февраля 2018 г.

№ 12-44/3070, Протокол Минприроды России от 22.01.2018 № 01-15/7-пр по вопросу статуса действующих проектов нормативов образования отходов и лимитов на их размещение (ПНООЛР) в связи с вступлением с 01.01.2018 запрета на захоронение отдельных видов отходов) [9].

Применение данного метода обращения с отходом является нерациональным, поскольку предусматривает необходимость: - уплаты экологического налога за хранение отходов в бюджет, в соответствии с Налоговым кодексом; - отведения земельного участка предприятия для неопределенно долгого хранения отходов.

Для решения этих проблем в нашей стране планируется создание ряда региональных центров по комплексной переработке гальваноотходов. Это особенно **актуально**, так как предотвратить их образование не удастся и в будущем. По оценке специалистов экономически целесообразно создавать центры переработки отходов мощностью от 10 т в сутки и более. При этом планируется решение задач по организации новых рабочих мест и снижению уровня безработицы.

**Целью** работы явилось снижение антропогенного воздействия на окружающую среду цинк - железо и никельсодержащих отходов гальванических производств за счет извлечения из них токсичных металлов и их соединений для вторичного применения.

1. Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

2. Исследовать процессы выделения соединений цинка железа и никеля из ГШ и определить рациональные условия их извлечения.

3. Разработать процессы утилизации извлеченных материалов с получением: пигментов-наполнителей для изготовления лакокрасочных изделий, металлического никеля, полиоксидных катализаторов, гидроксида Ni(OH)<sub>2</sub> для формирования оксидно-никелевого электрода Ni-Cd(Fe) аккумуляторов и ферритизированных магнитных частиц для получения магнитосорбентов для очистки воды от нефти и продуктов ее переработки.

4. Провести исследование физико-химических характеристик полученных продуктов и установить их соответствие ГОСТам и продуктам, используемым в промышленности.

**Результаты и обсуждение.** Саратов и саратовская область входит в десятку индустриально развитых регионов страны. Здесь имеются крупные предприятия машиностроительного профиля (ОАО «Трансмаш», ОАО завод металлоконструкций, ПАО «Сигнал-недвижимость», ОАО «Роберт-Бош-Саратов» и др.) с крупными гальваническими цехами и участками, на территории которых уже накоплено и продолжает образовываться большое количество гальваноотходов, содержащих соединения железа, никеля, цинка, меди и других металлов. Выбор надежных способов переработки и утилизации этих отходов и реализация малоотходных технологий весьма актуальны и своевременны.

Проведенные исследования ГШ предприятия ООО «Сигнал-Недвижимость» (рентгенофазовый, дериватографический) показали наличие в его составе тонкодисперсных соединений в пересчете на металлы: ~ 21 % железа (II и III), ~22 % цинка, ~7 % никеля и ~18,6 % хрома (II и III) и в небольших количествах ионы: Mn, Cu, Si, P, S, Na, Cl и др.

В составе ГШ предприятия ОАО «Роберт-Бош-Саратов» в наибольшем процентном соотношении присутствуют ионы Ni ~ 65 % и Fe ~ 30 %, и в незначительных количествах ионы: Mn, Cu, Zn, Si, P, S, Cl, Cr и др. Присутствующие в ГШ ионы никеля, хрома, меди определяют 2-3 класс опасности отхода для окружающей среды (в частности воды) и здоровья человека.

Для снижения класса опасности исходные ГШ подвергали последовательной кислотной (HNO<sub>3</sub> или H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) – щелочной (NaOH или KOH) обработке, для избирательного осаждения содержащихся в них гидроксидов металлов (Fe, Cr, Mn, Cu, Zn, Ni) при установленных величинах pH (табл. 1) [10].

**Таблица 1** — Ряд осаждения гидроксидов металлов из кислого раствора [10]

Ион	Fe (III)	Cr (III)	Cu (II)	Zn (II)	Fe (II)	Ni (II)	Mn (II)	Mg(II)
pH*	1,5*-4,1**	4,0-6,8	5,3-6,2	5,4-8,0	6,5-9,7	7,2-9,5	7,8-10,4	9,4-12,4

\* первая цифра – начало осаждения; вторая\*\* - полное осаждение гидроксида

Расчетным методом и биотестированием на тест-объектах (*Daphnia magna Straus*, *Chlorella vulgaris Beijer*) и по степени вредного воздействия отходов токсичных и опасных веществ показано, что извлечение тяжелых металлов позволяет снизить класс опасности гальваношламов со 2 - 3-го до 4-го.

Извлеченные гидроксиды железа и цинка необходимые для изготовления пигментов-наполнителей, подвергали дегидратации при 600 °С, получая порошки оксидов металлов (смесь оксидов железа (II и III) - магнетит имел желто-коричневого окрас, а оксида цинка - белый с оттенком бежевого). Характеристики пигментов наполнителей даны в таблицах 2 и 3. Установлено их соответствие промышленным пигментам - каолин и мел (табл. 2).

**Таблица 2** — Свойства пигментов-наполнителей

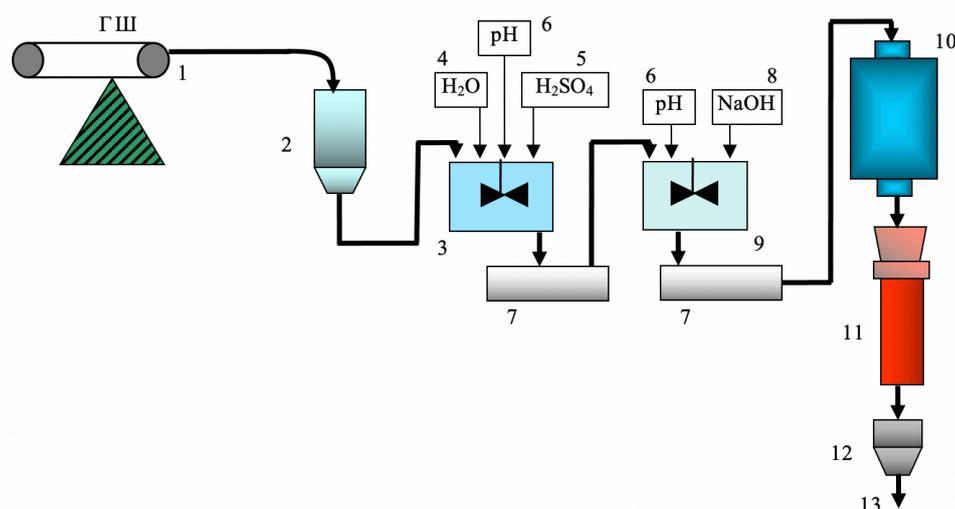
Наполнитель	Истинная плотность, кг/м <sup>3</sup>	Маслоемкость	pH вытяжки
Каолин	2540-2600	13-20	5 - 8
Мел	2710-2715	10-14	9 - 10
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	4830-4910	23-25	8 - 9
ZnO	5380-5640	24-28	8 - 10

Краски - цинковые белила и железный сурик, изготовленные на основе полученных пигментов-наполнителей в соответствии с требованиями ГОСТ 10503-71 «Краски масляные, готовые к применению» по содержанию летучих и нелетучих веществ, укрывистости, времени высыхания, вязкости и др. показали хорошие результаты (табл. 3).

**Таблица 3** — Характеристики красок на основе пигментов-наполнителей

Хакте- ристики	Содержание веществ, %		Вязкость, с	Степень перетира, мкм	Укрывистость г/м <sup>2</sup>	Время высыхания, ч	Твер- дость
	летучих	твердых					
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	11,1	74,7	59,6	28,9	110,2	21,3	0,074
ZnO	4,9	79,6	61,4	30,3	59,26	22,8	0,062
ГОСТ	до 20	≥ 60,0	65-140	≤ 70	≤ 170	24	≥ 0,05

Полученные результаты позволили разработать технологическую схему по производству пигментов-наполнителей (рис. 2).

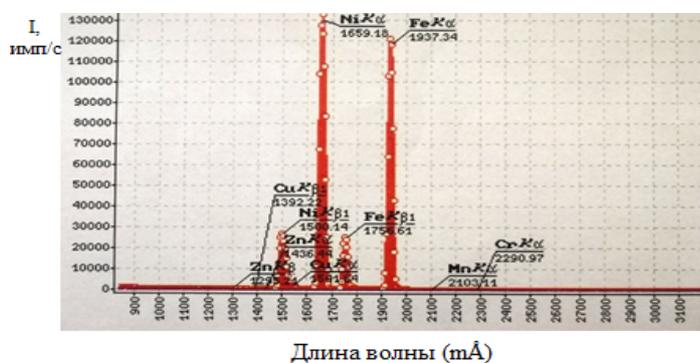


**Рисунок 1** — Технологическая схема получения пигментов-наполнителей:

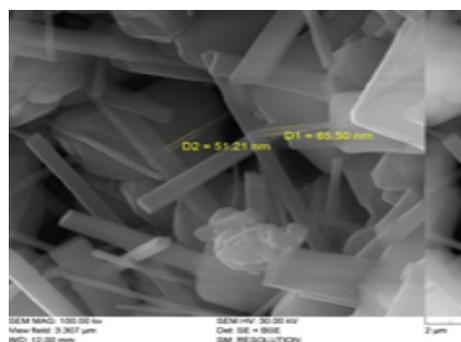
- 1 – транспортер; 2 – дозатор; 3 – ванна кислотной обработки; 4 – дозатор воды; 5 – дозатор H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; 6 – pH-метры; 7 – шнеки-питатели; 8 – дозатор щелочи; 9 – ванна щелочной обработки; 10 – центрифуга; 11 – печь обжига; 12 – бункер готовой продукции; 13 – на фасовку

Наличие ионов железа в составе ГШ позволяет получить магнетит и ферриты при ферритизации ГШ, что обуславливает проявление у ферритизированных гальваношламов (ФГШ) магнитных свойств [11,12]. Известен метод образования ферритов тяжелых металлов путем химической стабилизации шламов при протекании процесса ферритизации [11] благодаря наличию ионов Fe (II). Полученный порошкообразный ФГШ обладает хорошо выраженными магнитными свойствами [12] (установленная с помощью вибрационного магнитометра индукция насыщения составила  $\sim 0,02$  Тл). Это позволяет использовать его в качестве составного компонента при получении композиционных магнитосорбентов.

При ферритизации на поверхности частиц гидроксидов металлов формируются пленки смешанных оксидов ИТМ и железа – ферритов с общей формулой  $MeOFe_2O_3$ . Нами проведено исследование процесса ферритизации железосодержащего ФГШ термическим методом. Эмпирически установлены основные параметры процесса ферритизации:  $t \approx 1000$  °С и  $\tau = 1,5$  ч. Качественный анализ исходного ГШ и морфология поверхности ФГШ<sub>т</sub> даны на рисунках 4 и 5 ФГШ<sub>т</sub> использовали в качестве магнитной составляющей при изготовлении композиционных магнитосорбентов (КМС) для очистки сточных и поверхностных вод от нефти и нефтепродуктов (Н и НП).



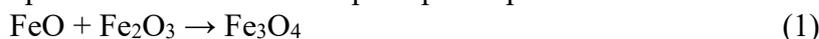
**Рисунок 2** — Качественный анализ ГШ<sub>исх.</sub> Спектр Кристалл LiF200



**Рисунок 3** — Морфология поверхности ФГШ<sub>т</sub>, x 100000

Морфология поверхности ФГШ<sub>т</sub>, изученная с использованием сканирующего электронного микроскопа, представляет сформированные соединения ферритов шпинельного типа (рис. 5), с остроконечной формой кристаллов.

Данные РФА полученного осадка (рис. 5) подтверждают отсутствие в обезвреженном шламе ионов других металлов и образование магнетитов при термообработке ГШ.

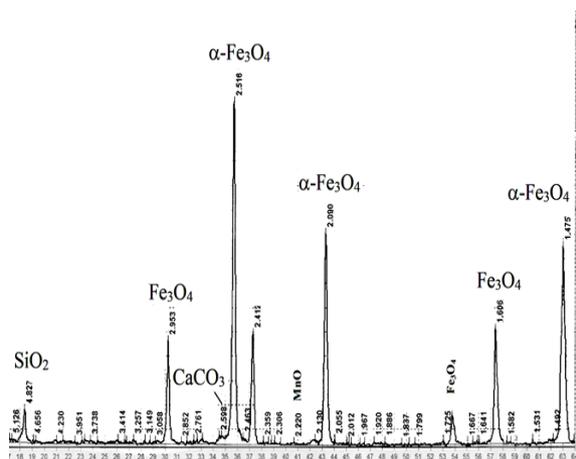


На анализаторе ANALYSETTE 22 NanoTecplus была измерена площадь удельной поверхности ФГШ<sub>т</sub> ( $3609 \text{ см}^2/\text{см}^3$ ) и распределение частиц по размерам (от 10 до 250 мкм).

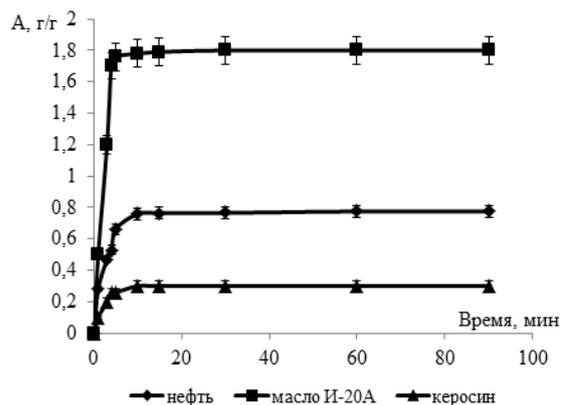
Для гидрофобизации ФГШ<sub>т</sub> и получения гранулированных нефтесорбентов использовали парафин в соотношении компонентов 1:2 по массе. Выбор парафина как связующего обусловлен присущими ему физико-химическими свойствами: меньшая плотность ( $0,880\text{--}0,915 \text{ г/см}^3$  – при  $15$  °С) по сравнению с водой, гидрофобность, инертность к большинству химических реагентов и нерастворимость в воде, а также его органическая природа, определяющая взаимодействие и сродство разработанного материала к нефти и нефтепродуктам. Установлено, что плавучесть полученных КМС в течение 96 ч составила 98–100 %, соответственно, водопоглощение не превышало –  $0,2 \text{ г/г}$ . Смачиваемость материалов оценивали методом измерения краевых углов сидящей капли, образуемой на поверхности уплотненного слоя материала. Краевой угол равен  $140^\circ$ , что свидетельствует о хорошей гидрофобности материалов. При контакте с маслом марки И–20А и нефтью происходит полное смачивание материалов, что указывает на их высокую олеофильность. Смачиваемость представляет собой один из адгезионных эффектов и указывает на то, что адгезия является основным механизмом взаимодействия органических поллютантов с

поверхностью разработанных материалов. Кинетические кривые сорбции нефти и НП представлены в виде зависимостей изменения адсорбционной емкости во времени (рис. 6).

Сорбционное равновесие при насыщении всеми видами нефтепродуктов и нефтью, достигается в первые 10–15 мин. контакта. Максимальная сорбционная емкость КМС составила 1,8 г/г и характерна для масла в виду его большей вязкости по сравнению с остальными поллютантами. Сорбционные свойства КМС оценивали по эффективности очистки воды от нефтезагрязнений: масла И–20А, нефти Илишевского месторождения, керосина в статических условиях (условия сорбции:  $v = 200$  об/мин,  $m_{\text{КМС}} = 1$  г/100 см<sup>3</sup>,  $\tau_{\text{сорбции}} = 1$  ч,  $t = 20$  °С). Эффективность очистки воды от НП составила 89–99 %. При этом адсорбенты, насыщенные НП, сохраняли свои магнитные свойства.



**Рисунок 4** — Данные РФА ГШ после термической обработки



**Рисунок 5** — Кинетические кривые сорбции нефтепродуктов КМС

Изучено влияние толщины пленки (1–5 мм) НП на сорбционную емкость полученных магнитосорбентов. Установлено, что контакт нефтяной пленки с поверхностью КМС является наибольшим и препятствует контакту адсорбента с водой. Установлено, что максимальная сорбционная емкость КМС достигается при толщине пленки  $\approx 3$  мм и составляет, г/г: 0,3 (керосин), 0,4 (нефть) и 1,3 (масло И–20А), соответственно. При контакте твердых олеофильных частиц магнитосорбента с пленкой нефти вокруг них образуются мицеллы, которые взаимодействуют между собой с образованием специфической сетчатой структуры, что приводит к образованию агрегатов КМС–НП, которые легко удаляются с помощью магнита. Поверхность воды после удаления насыщенного КМС была чистой, без нефтяной пленки.

Разработанные КМС могут быть использованы также в процессах удаления с водной поверхности других органических загрязнений при распылении порошка или мелких гранул. Сбор нефтесорбентов осуществляется судами со специальными магнитами, после чего проводят регенерацию нефтепродуктов и повторное использование сорбента. По завершении процесса сорбции поглощенные Н и НП извлекаются методом центрифугирования или на вакуум-фильтрах. Это позволяет повторно использовать нефтепродукты в промышленности, а также регенерировать сорбенты с возможностью их повторного использования. По истечении способности к сорбции/десорбции (после  $\sim 5$ -7 циклов регенерации) материалы могут подвергаться утилизации, например, пиролизом с получением тепловой энергии или в качестве смолистых добавок в асфальтовые смеси при производстве дорожных покрытий. При этом порошок отходов стальной металлической пыли, образующийся на конечной стадии пиролиза, может быть возвращён в процесс получения магнитосорбентов.

Полученный ферритизированный ГШ может быть использован для изготовления полиоксидных катализаторов. Учитывая, что в составе гальваношламов в значительных количествах присутствуют соединения Fe, Cr, Cu, Ni и других элементов, проявляющих

высокую каталитическую активность к реакциям окисления диоксида серы, монооксида углерода, органических примесей при температурах 300 - 500°C, одним из вариантов утилизации токсичных шламов предлагается создание на их основе эффективных дешевых полиоксидных катализаторов, которые можно использовать в качестве активного элемента систем очистки отходящих газов ряда промышленных производств.

Технология синтеза катализатора сводится к механохимической активации ФГШ путем измельчения на виброшаровой мельнице до размера частиц 0,5–5 мкм. Полученные материалы смешиваются с пластифицирующей и упрочняющей добавкой, например, распушенной природной глиной. После тщательного перемешивания полученную смесь доводят до влажности 26-28 % и проводят формирование геометрической формы экструзионным формированием через фильеру. При этом получают экструдат в виде черенка, блока сотовой структуры или в виде цилиндрических гранул, которые прокаливаются при температурах от 500 до 800°C. Полученные образцы обладают полидисперсной пористой структурой, обеспечивающей эффективное восстановление NO<sub>2</sub> и окисление SO<sub>2</sub>, CO и органических примесей, и поэтому могут быть использованы при очистке высокотемпературных отходящих газов металлургических, термохимических, теплоэнергетических производств [8, 13, 14].

Задача утилизации гальваноотходов с получением на их основе полиоксидных катализаторов является интересной и актуальной. Ее решение позволит в определенной мере утилизировать токсичные отходы гальваники, которых только в России накоплено несколько миллионов тонн, а также создать дешевые каталитически активные материалы, на базе которых можно эффективно подвергать очистке отходящие газы различных производств.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Представленные в работе данные по утилизации металлосодержащих гальваношламов в пигменты – наполнители для изготовления красок (цинковые белила и железный сурик), и получения ферритов железа, обладающих магнитными свойствами для изготовления композиционных магнитосорбентов, и изготовления полиоксидных катализаторов для очистки отходящих газов свидетельствуют о возможности использования ГШ для получения продуктов и товаров, имеющих важное народно- хозяйственное значение. Определены рациональные условия, процессов извлечения оксидов цинка и железа из металлосодержащих ГШ, установлены основные параметры полученных пигментов-наполнителей, показано их соответствие требованиям ГОСТ на получение лакокрасочных покрытий. Разработаны технологические решения и предложены экологически безопасные принципиальные технологии изготовления композиционных магнитных сорбционных материалов для эффективной очистки сточных и поверхностных вод от различных поллютантов (нефть, нефтепродукты, органические вещества).

Показано, что при утилизации и рациональном использовании отходов гальваношламов в пигменты - наполнители и лакокрасочные изделия и их применении в производстве композиционных магнитосорбентов для очистки водных объектов от нефти и нефтепродуктов можно получить экономическую и социальную выгоду. Так за счет расширения производства ожидается увеличение количества рабочих мест, получение прибыли, расширение ассортимента продукции и др. Переработка ГШ позволит предприятиям снизить плату за хранение опасных отходов и получить дополнительную экономическую выгоду от реализации новой промышленной продукции. Одновременно с этим будет решен и ряд важных экологических проблем – уменьшение площадей для организации и содержания полигонов и свалок, снижение вредного воздействия гальваношламов на окружающую природную среду и здоровье населения.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Ларионов Н.М., Рябышенков А.С. Промышленная экология: учебник. М.: Юрайт, 2016. 495 с.
2. Все об отходах Переработка, утилизация, оборудование, технологии <http://www.waste.org.ua> (дата обращения июль 2023 г.).
3. Когда Россия сможет перерабатывать мусор как в Европе? [Электронный ресурс] <https://www.factograph.info/a/29011375.html> (дата обращения июль 2023 г.).
4. Смирнов Д.Н. Очистка сточных вод в процессах обработки. Водохозяйственный комплекс России: понятие, состояние, проблемы // Водные ресурсы. 2010. №5. С. 617-632.
5. Технологические аспекты утилизации тяжелых металлов и их соединений из гальваношламов для вторичного применения: монография / Л.Н. Ольшанская, Е.Н. Лазарева, В.В. Егоров, А.В. Яковлев, Е.В. Яковлева. Саратов: СГТУ имени Гагарина Ю.А. 2017. 127 с. ISBN 978-5-9907991-5-8.
6. Свергузова С.В., Тарасова Г.И. Получение пигментов-наполнителей из хвостов обогащения железистых кварцитов // Строительные материалы. 2005. №7. С. 13-15.
7. Вербольт, С.В., Запарий М.М., Козлов В.В. Обезвреживание гальваношламов с выделением металлов // Экология и промышленность России. 2000. Апрель. С. 28-29.
8. Изготовление полиоксидных катализаторов на основе композиционного гальваношлама / Е.Н. Лазарева, Л.Н. Ольшанская, А.С. Мостовой, А.И. Курняев, Н.С. Немцов, И.А. Живов // Актуальные вопросы современной науки, технологии и образования: материалы I Межд. научно-технич. конф. 23 - 24 ноября 2020 г. Энгельс: ЭТИ (филиал) СГТУ имени Гагарина Ю.А., 2020. С. 305-308; ISBN 978-5-9907992-8-8.
9. ПИСЬМО от 2 февраля 2018 г. N 12-44/3070, Протокол Минприроды России от 22.01.2018 N 01-15/7-пр по вопросу статуса действующих проектов нормативов образования отходов и лимитов на их размещение (ПНООЛР) в связи с вступлением с 01.01.2018 запрета на захоронение отдельных отходов.
10. Лурье Ю.Ю. Справочник по аналитической химии. М.: Химия, 1971. 454 с.
11. Семенов В.В. Снижение экологической опасности шламов гальванических производств методом ферритизации: дис. ... канд. техн. наук: 03.00.16 / Семенов Виктор Валерьевич. – Ульяновск, 2004. – 130 с.
12. Долбня, И.В. Разработка магнитных композиционных сорбентов на основе гальваношлама для очистки воды от нефтепродуктов и ионов тяжелых металлов: дис. ...канд. техн. наук: 03.02.08 / Долбня Инна Валерьевна. – Казань, 2018. – 155 с.
13. Власенко В.М. Чернобривец В.Л., Курилец Я.П. Изучение сорбционно-каталитической очистки газов от этилхлоридгидрина на оксилнохромовом и кобальтохромовом катализаторах // ЖПХ. 1999. 3 7. С.1142-1147.
14. Керженцев М.А., Рогов О.А., Кириченко О.А. Исследование адсорбционных характеристик нанесенных оксидных катализаторов по отношению к органическим соединениям присутствующим в газовых выбросах // В сборнике: Дисперсные системы в природоохранных технологиях. Минск. 1991. С. 48-59.

**НОВЫЕ ПОДХОДЫ К ЭНЕРГО- И РЕСУРСООБЪЕКТИВНЫМ  
ТЕХНОЛОГИЯМ ТОПЛИВНЫХ СИСТЕМ  
NEW APPROACHES TO ENERGY- AND RESOURCE-EFFICIENT  
FUEL SYSTEMS TECHNOLOGIES**

**Светлана Георгиевна Дьячкова  
Svetlana G. Diachkova**

*Иркутский национальный исследовательский технический университет, Россия, Иркутск  
Irkutsk national research technical university, Russia, Irkutsk  
(e-mail: [dyachkova@ex.istu.edu](mailto:dyachkova@ex.istu.edu))*

*Аннотация:* В статье анализируются проблемы формирования топливных систем на примере топлива судового маловязкого и автомобильных бензинов в условиях импортозамещения, необходимости повышения глубины переработки нефти, экологичности и маржинальности топлив. Предложены новые инновационные решения данных проблем. Описаны новые подходы к энерго- и ресурсоэффективным технологиям, направленные на производство автобензинов и топлива маловязкого судового

*Abstract:* The article analyzes the problems of forming fuel systems using the example of low-viscosity marine fuel and motor gasoline in conditions of import substitution, the need to increase the depth of oil refining, environmental friendliness and marginality of fuels. New innovative solutions to these problems have been proposed. New approaches to energy- and resource-efficient technologies aimed at the production of motor gasoline and low-viscosity marine fuel are described.

*Ключевые слова:* автобензины, оксигенаты, топливные системы, топливо судовое маловязкое, депрессорные присадки, антиокислительные присадки

*Keywords:* motor gasolines, oxygenates, fuel systems, low-viscosity marine fuel, depressant additives, antioxidant additives.

Современное, интенсивное развитие и совершенствование техники, использующей в качестве топлив нефтепродукты, выдвигает жесткие требования к их эксплуатационным и экологическим характеристикам. Несмотря на возрастающие объемы производства и расширение ассортимента топлив, сегодня спрос на них удовлетворен не полностью. Это связано с тем, что отечественное производство компонентов и присадок к топливам покрывает не более половины общей потребности. И в условиях ограничения импортных поставок это принимает особое значение. Удовлетворение растущей потребности в топливах на фоне необходимости повышения глубины переработки нефти и снижения себестоимости продукции ставит перед исследователями задачу расширения сырьевой базы и разработки новых рецептур с заменой ценных компонентов на доступное нефтяное сырье.

Топливо маловязкое судовое (ТМС) – один из многотоннажных продуктов нефтепереработки. Традиционно в качестве компонентов ТМС используются дистиллятные фракции прямой и вторичной переработки нефти, востребованные также при производстве более высокомаржинальных нефтепродуктов. Вовлечение в ТМС более дешевых компонентов, имеющих в своем составе повышенное содержание сернистых, непредельных и полиароматических соединений, характеризующихся высокой плотностью, температурой застывания и помутнения, вязкостью и коксуемостью является сложной, малоизученной технологической задачей. Данная проблема решается либо за счет вовлечения топлива в капиталоемкие процессы депарафинизации и гидрогенизации, либо применением антиокислительных и депрессорно-диспергирующих присадок. Однако сведения об обоснованности выбора компонентов и присадок, о механизмах действия присадок в топливе очень ограничены, носят чисто эмпирический характер и не опираются на теоретические

исследования, объясняющие механизм взаимодействия углеводородов в топливно-дисперсной системе. А методы математического моделирования, учитывающие комплементарность и компенсируемость состава и физико-химических характеристик компонентов в процессе создания и оптимизации рецептур ТМС, практически не применяются. Разработка и внедрение в производство новых технологий обессеривания и депарафинизации идут крайне медленно.

На основе установленных закономерностей формирования углеводородного состава ТМС, создания математической модели для прогнозирования и оптимизации рецептуры ТМС, обоснования выбора антиокислительных (АО) и депрессорно-диспергирующих (ДД) присадок в зависимости от природы топливно-дисперсной системы, комплементарности и механизма взаимодействий между углеводородами топлива и присадок, реализации эффективных методов десульфуризации ТМС и предподготовки побочных продуктов нефтехимии и нефтепереработки расширена сырьевая база и разработаны новые рецептуры ТМС [1-8]. Впервые доказана возможность вовлечения в ТМС до 75% низкомаржинальных средних и тяжелых дистиллятов, таких как утяжеленные дизельные фракции установок АВТ-6 и ГК-3 (УДФ до 15%), легкий газойль замедленного коксования (ЛГЗК до 10%), тяжелая дизельная фракция (ТДФ до 60%) установки ГК-3 и вакуумный дистиллят (ВД до 35%), получаемое при этом ТМС отвечает найденным закономерностям по формированию оптимального углеводородного состава топлива, состоящего более чем на 95% из ароматических и парафино-нафтеновых углеводородов в соотношении ~ 1:2. На основании данных по влиянию антиокислительных присадок (ОП: Агидол-1, NMPA, Kerobit 3712, Kerobit TP26P, ЕС 5208А, ЕС 5202А, FOA 31А, FOA-8106, Difron SB-8) на стабильность компонентов ТМС доказана максимальная эффективность АОП фенольного ряда. В спектре ЭПР компонентов ТМС зарегистрирован сигнал с g-фактором 2.0067, интенсивность которого значительно снижается в присутствии АОП. Доказан радикальный механизм действия АОП и корреляции между эффективностью АОП и химической природой присадки и компонентов топлива. Предложены новые рецептуры топлива маловязкого судового, одна из которых позволяет получать стабильное при хранении топливо из смеси фракций первичной переработки нефти и тяжелых дизельных фракций вторичного происхождения, 0.04 мас.% ДДП OFI 8863 и 0.03 мас.% АОП Kerobit TP26P (патент № 2723633 РФ); вторая рецептура, полученная при вовлечении в качестве компонентов топлива до 75% утяжеленных фракций нефтепереработки, выкипающих при 370 – 410 °С и 0.1 мас.% низкомолекулярного полиэтилена, позволяет получать ТМС, соответствующее нормативным требованиям без добавки депрессорных присадок (патент № 2734259 РФ). Разработан способ получения нового компонента ТМС из отходов нефтепереработки после их обезвоживания и фракционирования с выходом до 30 %, вовлечение которого в ТМС (5%) даст экономический эффект ~ 7 млн.руб. Установлено преимущество окислительной десульфуризации (системой  $H_2O_2/CH_3COOH$ ) ТМС перед его гидроочисткой, состоящее в сохранении температурных характеристик исходного топлива ( $T_{всп}=99$  °С,  $T_{НК}=236$  °С), повышении его окислительной стабильности, сохранении смазывающей способности.

Несмотря на возрастающие объемы производства и расширение ассортимента автомобильных бензинов экологического класса, сегодня спрос на них удовлетворен не полностью. Вовлечение в бензины компонентов, полученных в результате этих вторичных процессов, увеличивает содержание полупродуктов сгорания в выхлопных газах. В связи с этим, в настоящее время особое значение приобретает синтез на базе промышленно доступного сырья новых кислородсодержащих соединений, проявляющих антидетонационную активность, и создание композиций на основе отечественных оксигенатов, способных за счет синергетического эффекта дать больший эколого-экономический эффект. Многообещающим инновационным направлением расширения сырьевой базы автобензинов является поиск новых способов переработки отходов и побочных продуктов нефтехимии и нефтепереработки, являющихся источником ценных углеводородов. Получение на их основе новых компонентов для автобензинов позволит снизить эмиссию

отработанных газов в атмосферу, увеличить объем выработки и маржинальность продукции. В результате исследований комплементарности и обнаруженного синергизма оксигенатов (метил-трет-бутилового эфира (МТБЭ) и изобутилового спирта (ИБС)), определения условий синтеза арилбутилацеталей из доступных синтонов, обладающих антидетонационными свойствами, реализации эффективных методов подготовки побочных продуктов синтеза бутиловых спиртов, процесса изомеризации и товарного производства, найдены новые подходы к формированию рецептур автомобильных бензинов, разработаны новые компоненты и присадки к автомобильным бензинам на базе промышленно доступного отечественного сырья [9-12]. Обнаружен синергетический эффект при совместном действии двухкомпонентной смеси МТБЭ и ИБС в соотношениях 20÷80 и 80÷20 мас.%, соответственно), проявляющийся в повышении октанового числа бензиновых фракций до 1.3-2.0 единиц по сравнению с таковым для индивидуальных оксигенатов. Синтезированные с выходом до 95% из промышленно доступных фенолов и винилбутиловых эфиров арилбутилацетали обладают высокими ОЧ смешения 103.3-110.0 ед. (на модельной топливной смеси), 93.3–100.0 (на базовом бензине), обеспечивают при 10% добавлении увеличение на 3 единицы ОЧ бензинов и их фазовую стабильность и являются новыми доступными, малотоксичными оксигенатными добавками, антидетонационные свойства которых зависят от их химической природы и уменьшаются при переходе от заместителей изо-строения к неразветвленным. Разработан способ получения нового компонента автобензинов на базе побочных продуктов (легкокипящего дистиллята фракционирования реакционной смеси синтеза бутиловых спиртов и гексановой фракции процесса изомеризации легкого прямогонного бензина в соотношении 1:9), вовлечение которого в количестве 8 мас.% приводит к повышению фазовой стабильности топлива и снижению себестоимости продукции. Установлена техническая возможность использования в качестве компонента автомобильных бензинов нефтесодержащих отходов, определено оптимальное количество их вовлечения (для АИ-80–15 об.%, для АИ-92–1 об.%), что позволяет решить вопрос утилизации отходов НПЗ и понизить себестоимость топлив, разработана технологическая схема получения нового компонента бензинов. Разработан способ определения октановых чисел смешения низкокипящих продуктов, позволивший определить более точные значения  $ИОЧ_{см}$  и ранее не определяемые  $МОЧ_{см}$ , показано, что  $ОЧ_{см}$  ГК зависит от химического состава базовых топлив: наибольшие значения  $ОЧ_{см}$  наблюдаются при вовлечении в топлива содержащие преимущественно изопарафиновые углеводороды ( $ОЧ_{см}$  для РС4 111.5, для ПАФ 111.7), наличие олефиновых углеводородов в базовом топливе приводит к снижению  $ОЧ_{см}$  газообразных компонентов ( $ОЧ_{см}$  для РС4 74.5, для ПАФ 61.6).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артемьева Ж. Н., Дьячкова С. Г., Кузора И. Е., Лонин М. А. Оценка возможности использования ловушечного нефтепродукта как компонента для приготовления средних и тяжелых дистиллятов // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. 2019. № 5. С. 3-9.
2. Artemyeva Zh. N., Kuzora I. I., D'yachkova S. G., Starikova O. V. Introduction of heavy diesel fractions of primary and secondary refining processes in the production of light oil products // Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology. 2019. V. 9. No. 2(29). P. 328-341.
3. Дьячкова С.Г., Ганина А.А. Кузора И.Е., Дубровский Д.А. Использование побочных потоков товарного производства нефтепродуктов // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2019. Т. 9. № 2. С. 328-341
4. Дьячкова С. Г., Артемьева Ж. Н., Гершпигель Т. Н, Прудникова Е. В Сравнение процессов гидрирования и окисления как методов улучшения эксплуатационных свойств топлива маловязкого судового // Теоретические основы химической технологии. 2022. Т.56. №3. С.358-368.

5. Дьячкова С.Г., Артемьева Ж. Н., Кузора И. Е., Вакульская Т.И. Топливо судовое маловязкое на базе тяжелых дизельных фракций вторичного происхождения. Проблемы и методы их решения // Нефтехимия. 2020. Т. 60. № 5. С. 715–723.
6. Дьячкова С.Г., Артемьева Ж. Н., Кузора И. Е., Вакульская Т.И. Дистилляты процессов коксования – новые компоненты топлива судового маловязкого // Химическая промышленность сегодня. 2021. №4. С.18-21.
7. Дьячкова С.Г., Артемьева Ж. Н., Кузора И. Е., Забродина С. В. Утилизация отходов нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств - новый экологичный подход к товарным продуктам // Экология и промышленность России. 2020. Т. 24. № 12. С. 23–27.
8. Дьячкова С.Г., Артемьева Ж. Н., Прудникова Е.В. Гель-проникающая хроматография, как метод контроля превращения тяжелых нефтяных фракций в ходе вторичных процессов нефтепереработки // «Заводская лаборатория Диагностика материалов». 2021. Т. 87. № 8. С. 5-10.
9. Дьячкова С. Г., Кузора И. Е., Ганина А.А., Ковалева Е.Б. Улучшение эксплуатационных свойств автобензинов за счет оптимизации состава // Известия вузов прикладная химия и биотехнология. 2023. Т.13. №1. С. 133-141.
10. Ковалева Е.Б., Дьячкова С. Г., Кузора И. Е., Ганина А.А. Влияние двухкомпонентных смесей простых эфиров и спиртов на эксплуатационные свойства автомобильных бензинов //Химия в интересах устойчивого развития 2022, Т. 30. С. 364–373.
11. Ганина А.А., Кузора И.Е., Дьячкова С.Г., Дубровский Д.А., Семёнов И.А. Разработка способа получения нового компонента автомобильных бензинов на базе побочного продукта нефтехимии // Теоретические основы химической технологии. 2020. Т. 54. № 4. С. 452-458.
12. Ганина А.А., Дьячкова С.Г., Ковалева Е.Б., Кузора И.Е., Сергеев В.А. Новый подход к определению октанового числа смешения газообразных компонентов автомобильных бензинов//Заводская лаборатория, диагностика материалов. 2023. Т. 89. №7. С. 14-20.

**МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ РАБОТЫ УТИЛИЗАТОРОВ  
ТЕПЛА НИЗКОГО ПОТЕНЦИАЛА  
OPERATIONAL REGIME OPTIMIZATION METHOD FOR LOW ENERGY POTENTIAL  
HEAT-RECOVERING HEAT EXCHANGERS**

**Андрей Борисович Гаряев, Ольга Евгеньевна Прун  
Andrey B. Gariayev, Olga E. Proon**

*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия, Москва  
National Research University "MPEI", Russia, Moscow  
(e-mail: GariayevAB@mpei.ru, olgaproon@mail.ru)*

*Аннотация:* Разработан метод оценки эффективности теплообменного оборудования для утилизации низкопотенциальной теплоты. Метод основан на вычислении и оптимизации критерия, представляющего собой разницу передаваемой в теплообменнике теплоты и затрат электрической энергии, необходимой на прокачку теплоносителей с учетом их различной энергетической ценности для потребителя. Учтены тепловыделения от трения в каналах теплообменника.

*Abstract:* An energy efficiency evaluation method for heat exchange equipment applied in heat-recovery systems with low energy potential was developed. Special criteria was developed that equals to the difference of a heat exchanger heat capacity and electrical capacity required for pumping heat carriers through heat exchangers. The criteria also takes into consideration the possible difference in values of heat and electrical energy for the final energy consumer and friction heat sources in channels of the heat exchanger.

*Ключевые слова:* теплообменный аппарат, утилизация теплоты, повышение эффективности, оптимизация.

*Keywords:* heat exchanger, heat energy recovery, energy efficiency, optimization method.

Утилизация тепла вентиляционного воздуха, газов и жидкостей, отходящих из энергетических и технологических установок, позволяет повысить эффективность его использования и добиться существенной экономии топливно-энергетических ресурсов. Для этого применяют утилизационные теплообменные аппараты различных конструкций и теплонасосные установки, которые возвращают в систему определенное количество теплоты. В то же время на привод нагнетателей при этом затрачивается дополнительная электрическая энергия для прокачки теплоносителей через теплообменник-утилизатор. Учитывая длительный срок службы теплообменных аппаратов, затрачиваемое количество электрической энергии на прокачку в течение всего срока их эксплуатации будет велико. При этом стоимость электрической энергии и удельные затраты на ее выработку существенно выше, чем то же для тепловой энергии. Кроме того, особенностью утилизации теплоты низкого потенциала является малый перепад температур между теплоносителями в теплоутилизаторе, а значит, для передачи достаточного количества теплоты требуется обрабатывать большие объемы теплоносителей. В данной связи особенно важной становится задача правильного выбора теплообменника-утилизатора таким образом, чтобы он мог принести максимум пользы и экономии для потребителя.

Схема типичной установки для утилизации теплоты вытяжного воздуха показана на рисунке 1.

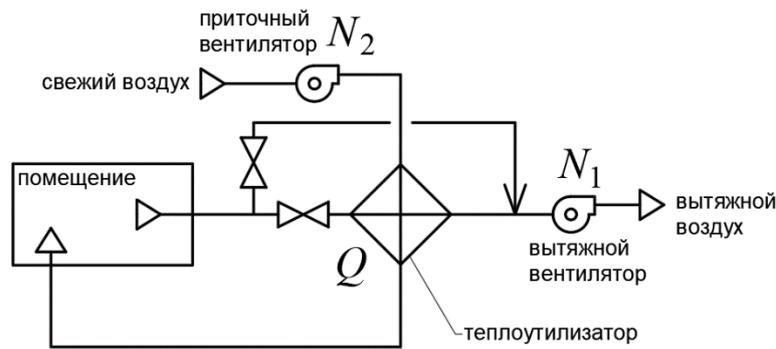


Рисунок 6 — Схема утилизации теплоты вытяжного воздуха.

Известные методы оценки эффективности теплообменных аппаратов, такие, как тепловая эффективность [1], введенная В.М. Кейсом и А.Л. Лондоном, и эксергетический КПД [2], не подходят для решения вышеуказанной задачи, поскольку не учитывают затраты электроэнергии на привод нагнетателей. Критерий М.В. Кирпичева и полученный на его основе энергетический коэффициент В.М. Антуфьева [3] учитывают затраты электрической мощности. Тем не менее они не будут показательными в данном случае, поскольку они, являясь удельными величинами, не учитывают количество утилизируемой теплоты, и, таким образом, не характеризуют полностью теплоутилизационную установку.

Мы предлагаем новый метод оценки эффективности теплообменных аппаратов, работающих в системах утилизации теплоты. Он основан на определении оптимального значения критерия, который мы назвали тепло-гидравлической функцией  $Z$ . Данная функция представляет собой разницу передаваемой в теплообменнике тепловой мощности  $Q$  и суммарной электрической мощности, необходимой на прокачку теплоносителей с учетом их различной энергетической ценности для потребителя  $\Sigma N$ .  $Z$  – это функция двух независимых переменных, которыми являются полные расходные теплоспособности теплоносителей  $W_1$  и  $W_2$  (их старое название – водяные эквиваленты), вычисляется по формуле (1)

$$Z = Q - b \cdot \Sigma N. \quad (1)$$

Здесь  $b$  – коэффициент, который характеризует соотношение ценности электрической и тепловой энергии для потребителя. Его величина может быть определена, как отношение удельных затрат условного топлива на производство электричества и теплоты, или как отношение тарифов на электрическую энергию и теплоту в том случае, если потребителя больше интересует финансовый результат.

Преимуществом применения данной функции в качестве критерия эффективности являются то, что он всегда имеет экстремум в рассматриваемой области. Отметим, что критерии М.В. Кирпичева и В.М. Антуфьева являются монотонно убывающими функциями для заданного теплообменного аппарата при увеличении расходов теплоносителей. Другим преимуществом является возможность напрямую связать его с экономией финансовых средств, получаемых при утилизации теплоты.

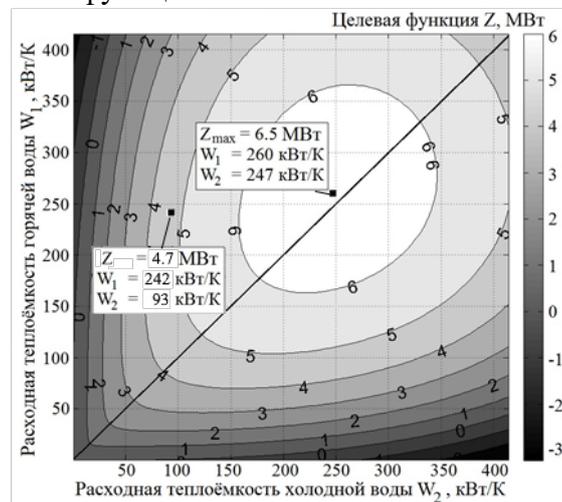
Для вычисления тепло-гидравлической функции необходимо провести серию поверочных расчетов рассматриваемого теплообменного аппарата для разных значений расходов теплоносителей при их заданных температурах на входе. Далее необходимо провести гидравлические расчеты теплообменника по каждому теплоносителю. Часто теплообменный аппарат вносит наибольший вклад в гидравлическое сопротивление системы, в которой он функционирует. Однако это происходит не всегда, поэтому гидравлический расчет должен проводиться по всей системе, то есть он должен учитывать не только гидравлическое сопротивление теплообменного аппарата, но и полное гидравлическое сопротивление каждого контура, по которому движутся теплоносители.

Метод предполагает оптимизацию режима работы теплообменного аппарата в составе теплоутилизационной установки, либо выбор наилучшего аппарата из типоразмерного ряда, который обеспечит необходимые требования к системе (заданную тепловую мощность или

требуемые потери давления). Если стоит задача выбора теплообменного аппарата из типоразмерного ряда аппаратов, то следует выбрать тот, для которого значение функции  $Z$  является наибольшим для рассматриваемых условий.

Наличие экстремума на рассматриваемой области позволяет ввести также абсолютный критерий, который представляет собой отношение тепло-гидравлической функции для реальных условий работы к ее теоретически максимальному значению. Из двумерного графика для  $Z$  на рисунке 2 можно видеть, что значение данного критерия составляет  $C = Z/Z_{\max} = 0,72$ . Критерий определяет долю полезно используемой энергии при данных условиях работы от максимально возможной, которую можно получить при заданных температурах теплоносителей на входе, подобрав оптимальные расходы теплоносителей. Таким образом, он показывает, насколько хорошо подходит теплообменный аппарат для заданных условий его работы с точки зрения эффективности использования энергии (C-conditions).

В случае, когда гидравлическое сопротивление аппарата велико, необходимо учесть, что основная часть электрической энергии, затрачиваемая нагнетателями, переходит в теплоту и повышает температуру теплоносителей. Данное тепловыделение должно быть корректно учтено в формулировке целевой функции.



**Рисунок 7** — Тепло-гидравлическая функция пластинчатого водонагревателя (значения функции  $Z$  рассчитаны при  $b = 5$ ).

Поскольку нагреву из-за трения подвергаются оба теплоносителя, то нужно рассмотреть, к каким последствиям приведет нагрев каждого из них. Если горячий теплоноситель нагревается, то этот нагрев приведет к увеличению разности температур между теплоносителями и росту теплового потока, передаваемого в теплообменнике. Рост температуры холодного теплоносителя, наоборот, будет приводить к уменьшению разности температур между теплоносителями и снижению теплового потока, передаваемого в теплообменнике. В рассматриваемом случае целевая функции вид примет вид (2):

$$Z = (Q + N_2) - b \cdot (N_1 + N_2). \quad (2)$$

Здесь  $N_2$  - электрическая мощность, затрачиваемая нагнетателем на прокачку холодного теплоносителя по тракту теплообменника, а  $Q$  - тепловая мощность, передаваемая в теплообменнике, определенная с учетом нагрева горячего и холодного теплоносителей при их прокачке. Данное значение  $Q$  можно вычислить, если рассмотреть задачу о передаче теплоты в теплообменном аппарате с тепловыделениями. Для определенности можно принять тепловыделения за счет трения линейно зависящими от длины каналов теплообменного аппарата. В этом случае дифференциальное уравнение для распределения разности температур между теплоносителями  $\Delta t = (t_1 - t_2)$  по площади поверхности теплообмена  $F$  будет иметь вид (3):

$$d(t_1 - t_2) = -mk dF(t_1 - t_2) + a dF. \quad (3)$$

Здесь  $m$  и  $a$  – коэффициенты, которые для прямоточной схемы и противоточной схемы движения теплоносителей имеют различные значения:

$$m = \frac{1}{W_1} + \frac{1}{W_2}; \quad a = \frac{q_1}{W_1} - \frac{q_2}{W_2} \text{ - для прямотока;}$$

$$m = \frac{1}{W_1} - \frac{1}{W_2}; \quad a = \frac{q_1}{W_1} + \frac{q_2}{W_2} \text{ - для противотока;}$$

где  $q_1, q_2$  – удельные плотности тепловых потоков от трения в теплоносителях, Вт/м<sup>2</sup>.

Данное уравнение имеет аналитическое решение (4):

$$\Delta t = \left( \Delta t_o - \frac{a}{mk} \right) \exp(-mkF) + \frac{a}{mk}, \quad (4)$$

где  $\Delta t_o$  – разность температур теплоносителей во входном сечении по горячему теплоносителю.

Использование данного решения позволяет провести анализ поведения целевой функции при соизмеримых значениях передаваемой тепловой мощности и затрат электроэнергии на перекачивание теплоносителей по тракту теплообменника. Учет данного явления заметно смещает границу, при которой целевая функция принимает нулевое значение, т.е. при достижении которой использование теплообменника, в качестве теплоутилизатора, невыгодно.

Влияние этого эффекта на положение и величину максимум целевой функции зависит от многих факторов, требует отдельного изучения и будет предметом дальнейшего исследования.

Полученное решение позволяет найти значение среднеинтегральной разности температур с учетом тепловыделений в потоках теплоносителей. Она имеет вид (5):

$$\Delta t = \frac{\Delta t' - \Delta t''}{\ln \frac{\Delta t' - a/mk}{\Delta t'' - a/mk}} + \frac{a}{mk}. \quad (5)$$

На основании этой разности температур могут быть предложены инженерные методы расчета таких теплообменников.

Проведенные на основе применения предложенного метода расчеты различных теплообменных аппаратов показали, что их правильный подбор для теплоутилизационной установки, работающей в заданном режиме, позволяет обеспечить значительную экономию топливно-энергетических ресурсов в течение всего срока эксплуатации установки [4-7].

Метод может быть применен для анализа эффективности теплообменных аппаратов, работающих в различных системах утилизации теплоты, в том числе, в установках с промежуточным теплоносителем, с глубокой утилизацией теплоты (с конденсацией теплоты из влажных газов), термохимической рекуперацией, а также установок, использующих тепловые насосы. Предлагаемый подход может служить методической основой разработки конструкций эффективных теплообменных аппаратов, использующихся при малых перепадах температур между теплоносителями. Исходя из нужд проектирования для каждого теплообменного аппарата было бы полезно рассчитывать тепло-гидравлическую характеристику на типовые для его работы температуры теплоносителей и включать ее в состав технической документации.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования России, гос. задание № FSWF-2023-0017.*

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Кэйс В.М. Компактные теплообменники / В.М. Кэйс, А.А. Лондон. М.: Энергия, 1967. 223 с.
2. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях: учебник / А.Б. Гаряев, И.В. Яковлев, А.В. Клименко, и др.; под ред. А.В. Клименко. Изд.4, перераб. и доп.- М: Издательство МЭИ, 2021 г., - 504 с.
3. А.Н. Иванов, Белоусов В.Н., Смородин С.Н. Теплообменное оборудование промпредприятий: учебное пособие / ВШТЭ СПбГУПТД. - СПб., 2016 – 184 с.
4. А.Б. Гаряев, О.Е. Прун, А.В. Клименко «Определение оптимального соотношения характеристик микроканальных теплообменных аппаратов» // Теплофизика и аэромеханика. Том 22, №6. / Новосибирск: Издательство СО РАН, 2015 – стр.: 751 – 760 с.
5. Прун О.Е., Гаряев А.Б., Сынков И.В. «Оптимизация теплогидравлических характеристик водоохлаждаемых газоходов для утилизации теплоты выхлопных газов газоперекачивающих агрегатов» // Вестник МЭИ: теоретический и научно-практический журнал. №6 / Москва: Издательский дом МЭИ, 2017 – с. 30-35
6. О.Е. Прун, А. Б. Гаряев «Метод оптимизации теплообменных аппаратов, работающих в системах утилизации тепла» // Теплоэнергетика, 2020, № 8, с. 78–85 DOI: 10.1134/S0040363620080044
7. Прун О.Е., Гаряев А.Б. Оптимизация тепло-гидравлических характеристик теплообменников-теплоутилизаторов / Материалы Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XXII Бенардосовские чтения)», Иваново, 2023. С. 231-233.

**КАПСУЛИРОВАНИЕ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ  
В ПСЕВДООЖИЖЕННОМ СЛОЕ  
COATING OF PARTICULATE MATERIALS IN FLUIDIZED BED**

**Александр Геннадьевич Липин, Андрей Александрович Липин  
Alexander G. Lipin, Andrey A. Lipin**

*Ивановский государственный химико-технологический университет, Россия, Иваново  
Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Russia, Ivanovo  
(e-mail: 157lipin@mail.ru, lipin.a@mail.ru)*

*Аннотация:* Путем капсулирования зернистых материалов можно модифицировать их свойства, обеспечивать замедленное выделение активного вещества. При формировании тонких полимерных оболочек очень важно определение режимных параметров процесса, обеспечивающих равномерность нанесения защитного покрытия. Качество проведения процесса капсулирования оценивалось по величине степени покрытия, которая равна доле общей поверхности частиц, покрытой защитной оболочкой. Представлена математическая модель, позволяющая прогнозировать степень покрытия частиц в аппарате кипящего слоя. Приведены результаты экспериментальных исследований процесса капсулирования.

*Abstract:* By encapsulating granular materials, it is possible to eliminate caking, to provide a delayed release of the active substance. When thin polymer shells are applied, it is very important to determine the process parameters that ensure the uniformity of the protective coating. The quality of the encapsulation process was evaluated by the degree of coverage, which is equal to the fraction of the total surface area of the particles coated with a protective coating. A mathematical model, which allows to predict the particles coverage degree in the fluidized bed apparatus, is given. The results of experimental studies of the encapsulation process are presented.

*Ключевые слова:* моделирование, капсулирование, степень покрытия, псевдооживленный слой

*Key words:* modeling, encapsulation, the degree of coverage, fluidized bed

Капсулирование — это физико-химический или механический процесс заключения мелких частиц вещества в оболочку из пленкообразующего материала. Оно широко применяется в различных отраслях промышленности. Капсулированные вещества используются при получении композиционных материалов [1], создании реагентов с регулируемым выпуском активного компонента [2]. В пищевой и фармацевтической промышленности капсулирование биоактивных компонентов используется для регулирования окислительно-восстановительных реакций, корректирования вкуса, цвета и запаха, увеличения срока годности, защиты от воздействия окружающей среды [3]. Капсулирование семян различных растений применяется для защиты от негативного воздействия окружающей среды и обеспечения питательными веществами в период прорастания [4]. Капсулирование является основным способом получения удобрений с регулируемым выделением питательных веществ [5].

По размеру капсулы делят на три типа:

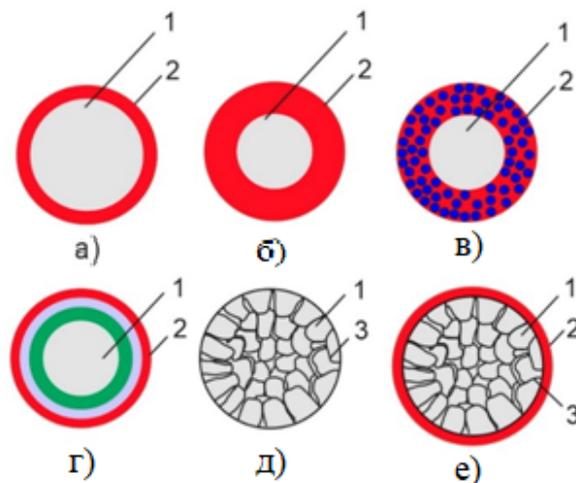
- 1) Макрокапсулы – размер порядка нескольких миллиметров;
- 2) Микрокапсулы – размер от микрометров до сотен микрон;
- 3) Нанокпсулы – меньше микрона.

По структуре капсулированные гранулы (рис.1) можно подразделить на [6]:

- 1) Гранулы с однофазной оболочкой;
- 2) Гранулы с многофазной оболочкой;
- 3) Гранулы с многослойной оболочкой;

## 4) Каркасные гранулы.

Многофазная оболочка капсулированных гранул состоит из наполнителя и связующего вещества. Гранулы с такими оболочками обладают высокой механической прочностью и длительным временем растворения. Материалами для их изготовления могут быть отходы различных производств.



**Рисунок 1** — Типы структур гранул пролонгированного действия:

а – гранула с однофазной тонкой оболочкой; б – гранула с однофазной толстой оболочкой; в – гранула с многофазной оболочкой; г – многослойная гранула; д – каркасная гранула; е – каркасная гранула, покрытая оболочкой;

1 – растворяемое вещество; 2 – оболочка; 3 – каркас

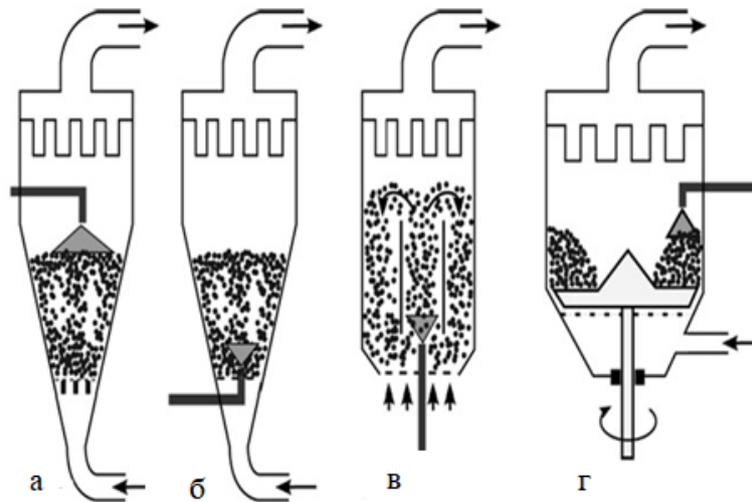
Многослойная гранула состоит из ядра, покрытого несколькими оболочками из различных веществ. Многослойные гранулы изготавливают или по технологическим соображениям, или для достижения заданной кинетики растворения. Изменяя вид, количество и последовательность нанесения оболочки можно получать гранулы пролонгированного действия практически с любой задаваемой кинетикой растворения. Такие гранулы могут высвобождать различные растворимые вещества в различные периоды растворения и могут обладать значительным сроком действия.

Каркасные гранулы, покрытые одной или несколькими оболочками, имеют высокую механическую прочность даже при полном растворении минерального вещества. Такие гранулы пролонгированного действия, наряду с возможностью задания требуемой кинетики растворения, могут обладать длительным временем растворения. Получают их последовательным нанесением оболочек на ядро, состоящее из каркаса, заполненного минеральным веществом.

Разработано множество различных методов производства капсулированных материалов. Известны такие методы как дражирование, капсулирование в псевдооживленном слое, распылительная сушка, распылительная заморозка, включение в матрицу (каркасные гранулы), экструзия, соэкструзия. Эти методы при разнообразии капсулирующих материалов дают возможность создавать капсулы, высвобождающие содержимое при самых разных условиях [7]. Выбор технологической схемы получения капсулированных гранул должен определяться структурой получаемых гранул, техническими требованиями, предъявляемыми к ним, физико-химическими свойствами материалов, техническими возможностями и объемом производства.

Широкое применение нашел метод капсулирования в псевдооживленном слое. Исторически аппараты кипящего слоя в основном использовались для осуществления процесса гранулирования, а не капсулирования. Широкий разброс по времени пребывания частиц в классическом аппарате кипящего слоя мешает получать однородную толщину покрытия на гранулах.

Для осуществления процесса капсулирования были предложены модифицированные аппараты взвешенного слоя. Прежде всего, это аэрофонтанные и многосекционные аппараты. Форсунки, из которых распыливается раствор капсулянта, могут быть установлены внизу (рис. 2, б, в), вверху (рис. 2, а) и в боковой стенке аппарата.

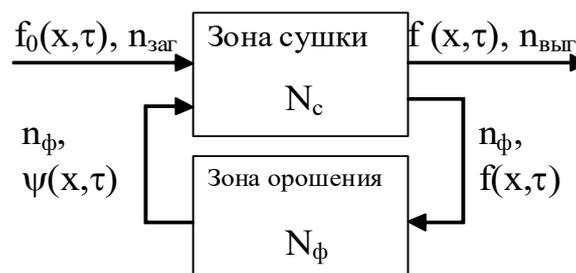


**Рисунок 2** — Аппараты для капсулирования в псевдооживленном слое: а – с верхним распылом; б – с нижним распылом; в – аппарат с трубой Вурстера; г – аппарат с боковым распылом и вращающимся диском

Важным фактором, определяющим качество процесса капсулирования, является равномерность нанесения покрытия. Исследованию параметров процесса капсулирования, влияющих на равномерность нанесения покрытия, посвящен ряд работ. В них различными методами решается задача нахождения распределения частиц по массам покрытия. Такой подход вполне логичен при формировании толстых покрытий. При нанесении тонких покрытий более объективную информацию о равномерности нанесения покрытия дает функция распределения частиц по степени покрытия. Под степенью покрытия понимают долю общей поверхности частиц, покрытой защитной оболочкой.

При разработке математической модели, рабочий объем аппарата псевдооживленного слоя рассматривали как систему, состоящую из двух взаимодействующих зон: сушки и орошения (рис.3). В зоне орошения форсунки происходит формирование покрытия, в зоне сушки отверждение плёнки и смешение вновь поступающих частиц [8].

Принимались следующие допущения: частицы в слое идеально перемешаны (это предположение оправдывается интенсивной циркуляцией в аппарате); частицы монодисперсные и имеют форму шара; все капли плёнкообразующего вещества попадают на частицы материала, находящиеся в зоне орошения; вероятность попадания частиц в зону орошения не зависит от степени покрытия; активная циркуляция частиц в слое предотвращает слипание частиц.



**Рисунок 3** — Схема потоков

Запишем уравнения баланса для изменения числа частиц в системе.

$$N_c \partial f(x, \tau) / \partial \tau = n_{\text{заг}} f_0(x, \tau) + n_{\phi} \psi(x, \tau) - n_{\phi} f(x, \tau) - n_{\text{выг}} f(x, \tau) \quad (1)$$

$$N_{\phi} \partial \psi(x, \tau) / \partial \tau + N_{\phi} \partial [\lambda(x) \cdot \psi(x, \tau)] / \partial x = n_{\phi} f(x, \tau) - n_{\phi} \psi(x, \tau) \quad (2)$$

Уравнение (1) представляет собой баланс частиц со степенью покрытия  $x$  в произвольный момент времени  $\tau$  в зоне сушки, уравнение (2) - то же самое для зоны орошения. В этих уравнениях  $f(x, \tau)$  и  $\psi(x, \tau)$  - функции плотности распределения частиц по степени покрытия в зонах сушки и орошения;  $n_{\text{заг}}$ ,  $n_{\text{выг}}$  - количество, соответственно, загружаемых и выгружаемых из аппарата частиц в единицу времени;  $n_{\phi}$  - количество частиц, циркулирующее через зону орошения в единицу времени;  $N_c$ ,  $N_{\phi}$  - соответственно, число частиц в зонах сушки и орошения;  $\lambda(x)$  - скорость изменения степени покрытия,  $f_0(x)$  - функция плотности распределения по степени покрытия загружаемых частиц.

Преобразуем уравнения (1), (2) к виду:

$$N_c \partial f(x, \tau) / \partial \tau = n_{\text{заг}} f_0(x, \tau) + n_{\phi} \psi(x, \tau) - n_{\phi} f(x, \tau) - n_{\text{выг}} f(x, \tau), \quad (3)$$

$$\partial \psi(x, \tau) / \partial \tau + \partial [\lambda(x) \psi(x, \tau)] / \partial x = k_{\phi} f(x, \tau) - k_{\phi} \psi(x, \tau), \quad (4)$$

где  $k_{\text{заг}}$ ,  $k_c$ ,  $k_{\phi}$ ,  $k_{\text{выг}}$  - относительные расходы частиц при загрузке, через зону сушки, через зону орошения форсунки, при выгрузке.

$$k_{\text{заг}} = n_{\text{заг}} / N_c, \quad k_c = n_{\phi} / N_c, \quad k_{\phi} = n_{\phi} / N_{\phi}, \quad k_{\text{выг}} = n_{\text{выг}} / N_c. \quad (5)$$

Учитывая допущение о монодисперсности частиц слоя, можно записать:

$$k_{\text{заг}} = G_{\text{заг}} / M_{\text{сл}}, \quad k_c = G_{\phi} / M_{\text{сл}}, \quad k_{\phi} = G_{\phi} / M_{\phi}, \quad k_{\text{выг}} = G_{\text{в}} / M_{\text{сл}}, \quad (6)$$

где  $M_{\text{сл}}$ ,  $M_{\phi}$  - масса частиц в зоне сушки и в зоне орошения, кг;  $G_{\phi}$ ,  $G_{\text{заг}}$ ,  $G_{\text{в}}$  - расходы частиц через зону орошения, при загрузке и выгрузке, соответственно.

Допустим, что скорость роста степени покрытия пропорциональна доле поверхности гранул, свободной от покрытия  $(1-x)$ :

$$\lambda(x) = k_{\lambda} (1-x), \quad (7)$$

где  $k_{\lambda}$  - константа скорости роста степени покрытия, зависящая от режима работы форсунки и свойств пленкообразующего вещества.

В стационарном режиме  $\partial f(x, \tau) / \partial \tau = 0$  и  $\partial \psi(x, \tau) / \partial \tau = 0$ ,  $k_{\text{выг}} = k_{\text{заг}}$ . Подставим в (4) выражение (7), получим следующую систему уравнений:

$$f(x) = [k_{\text{заг}} \cdot f_0(x) + k_c \cdot \psi(x)] / (k_c + k_{\text{заг}}), \quad (8)$$

$$k_{\lambda} d[(1-x) \cdot \psi(x)] / dx = k_{\phi} f(x) - k_{\phi} \psi(x). \quad (9)$$

Решение этой системы позволило получить дифференциальную функцию распределения частиц по степени покрытия в псевдооживленном слое:

$$f(x) = [k_{\text{заг}} \cdot \delta(x, 0) + k_c (1-a)(1-x)^{-a}] / (k_c + k_{\text{заг}}), \quad (10)$$

где

$$a = [k_{\lambda} - k_{\phi} + k_{\phi} \cdot k_c / (k_c + k_{\text{заг}})] / k_{\lambda}.$$

Интегрируя выражение (10), находим интегральную функцию распределения:

$$F(x) = \int_0^x f(x) dx = k_{\text{заг}} / (k_c + k_{\text{заг}}) + k_c [1 - (1-x)^{1-a}] / (k_c + k_{\text{заг}}), \quad (11)$$

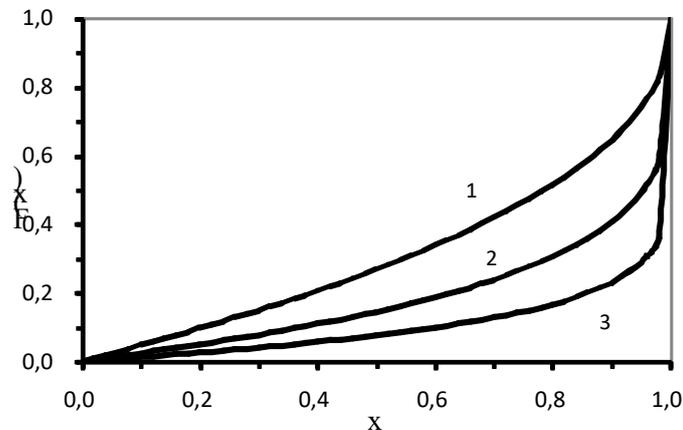
которую более удобно использовать для оценки равномерности распределения покрытия.

Отметим, что вычисление средней степени покрытия частиц  $x_c$ , при стационарном режиме работы аппарата, путем интегрирования функции плотности распределения (10), приводит к выражению:

$$x_c = -[k_{\text{заг}} x_{\text{заг}} (k_{\lambda} + k_{\phi}) + k_{\lambda} k_c] / [(k_c + k_{\text{заг}})(k_{\lambda} + k_{\phi}) - k_{\phi} k_c]. \quad (12)$$

На рис. 4 приведены графики функции  $F(x)$ , рассчитанной по формуле (11). Анализ данных кривых показывает, что с увеличением отношения количества плёнкообразующего

вещества к массе обрабатываемых гранул  $\mathbf{B}$ , качество покрытия улучшается, но все же остаётся определённая доля частиц с малой степенью покрытия. Это объясняется тем, что для односекционного аппарата кипящего слоя характерен широкий спектр распределения частиц по времени пребывания. Лучшую равномерность нанесения плёнкообразующего вещества может обеспечить многосекционный аппарат кипящего слоя.



**Рисунок 4** — Интегральная функция распределения частиц по степени покрытия в односекционном аппарате: 1 –  $k_{\text{заг}}=0,16$ ,  $B=0,05$ ; 2 –  $k_{\text{заг}}=0,32$ ,  $B=0,1$ ; 3 –  $k_{\text{заг}}=0,64$ ,  $B=0,2$

Для стационарного режима работы среднюю степень покрытия частиц на выходе из многосекционного аппарата можно рассчитать, применяя формулу (12), последовательно для каждой секции аппарата.

Функцию распределения частиц по степени покрытия на выходе из многосекционного аппарата кипящего слоя целесообразно находить, решая уравнения (8), (9) численным методом, последовательно для каждой секции [10]. Путем алгебраических преобразований формул (8), (9) получаем уравнение

$$\frac{d}{dx} [(1-x) \cdot \psi(x)] = \frac{k_{\phi} \cdot k_{\text{заг}}}{k_{\lambda} \cdot (k_c + k_{\text{заг}})} \cdot f_0(x) - \frac{k_{\phi} \cdot k_{\text{заг}}}{k_{\lambda} \cdot (k_c + k_{\text{заг}})} \cdot \psi(x). \quad (13)$$

Интервал  $[0, 1]$  изменения  $x$  разбивается на  $n$  равных частей точками  $x_j = \Delta x \cdot n$ ,  $i=0,1,\dots,n$ . Производную в уравнении (13) заменяем конечной разностью. Используем «разность назад». Конечно-разностный аналог уравнения (13) имеет вид:

$$\begin{aligned} [(1-x_i) \psi_i - (1-x_{i-1}) \psi_{i-1}] / \Delta x &= b \cdot f_{0,i} - b \cdot \psi_i, \quad i = 2, 3, \dots, n, \\ b &= k_{\phi} k_{\text{выг}} / [k_{\lambda} (k_c + k_{\text{выг}})]. \end{aligned} \quad (14)$$

Отметим, что использование конечно-разностного аналога (14) подразумевает введение дискретной ступенчатой аппроксимации непрерывной кривой функции распределения. По физическому смыслу значение  $\psi_i \cdot \Delta x$  равно доле частиц, имеющих степень покрытия в интервале от  $x_{i-1}$  до  $x_i$ . Условие нормирования функций распределения примет вид:

$$\sum_{i=1}^n \psi_i \cdot \Delta x = 1, \quad \sum_{i=1}^n f_{0,i} \cdot \Delta x = 1. \quad (15)$$

Таким образом, если загружаются непокрытые частицы, функция распределения будет определена следующим образом:

$$f_{0,1} = 1/\Delta x, \quad f_{0,i} = 0 \quad \text{для } i = 2, 3, \dots, n. \quad (16)$$

Преобразуем уравнение (14) к виду:

$$[1-x_i + b \cdot \Delta x] \psi_i - (1-x_{i-1}) \psi_{i-1} = b \cdot \Delta x \cdot f_{0,i}. \quad (17)$$

Выполняем алгебраические преобразования, получаем расчетное уравнение для функции  $\psi_i$ :

$$\psi_i = \left[ (1-x_{i-1}) \psi_{i-1} + b \cdot \Delta x \cdot f_{0,i} \right] / (1-x_i + b \cdot \Delta x), \quad i = 2, 3, \dots, n. \quad (18)$$

Учитывая, что  $\psi_0=0$ , получаем расчетное уравнение для доли частиц первого интервала:

$$\psi_1 = b \cdot \Delta x \cdot f_{0,i} / (1 - x_1 + b \cdot \Delta x). \quad (19)$$

Применяя последовательно соотношения (18) и (19), рассчитываем функцию распределения частиц по степени покрытия в зоне орошения форсунки  $\psi(x_i)$ . Далее в соответствии с формулой (8) определяем функцию распределения частиц по степени покрытия в зоне сушки:

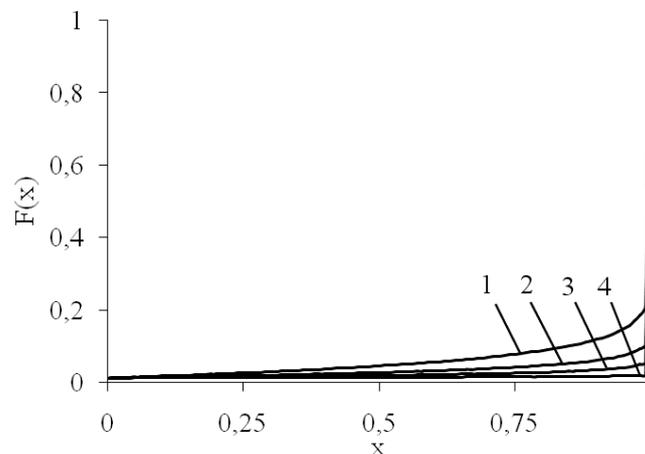
$$f_i = (k_{\text{заг}} f_{0,i} + k_c \psi_i) / (k_c + k_{\text{заг}}), \quad i = 1, \dots, n \quad (20)$$

Значения интегральной функции распределения рассчитываем по формуле:

$$F_i = \sum_{k=1}^i f_k \cdot \Delta x, \quad i = 1, \dots, n \quad (21)$$

При расчете многосекционного аппарата найденные значения  $f_i$  будут являться значениями функции загрузки для последующей секции.

На рис. 5 представлены графики функций  $F(x)$ , рассчитанные по изложенной методике, при различном количестве секций в аппарате.



**Рисунок 5** — Интегральная функция распределения частиц по степени покрытия на выходе из многосекционного аппарата кипящего слоя: номер кривой соответствует количеству секций в аппарате.  $k_{\text{заг}}=0,00083$ ,  $k_c=0,066$ ,  $k_\phi=15,9$

Графики этого рисунка свидетельствуют о существенном улучшении качества покрытия при увеличении числа секций в аппарате. При выбранных параметрах процесса капсулирования практически все частицы на выходе из четырехсекционного аппарата имеют степень покрытия 100 %.

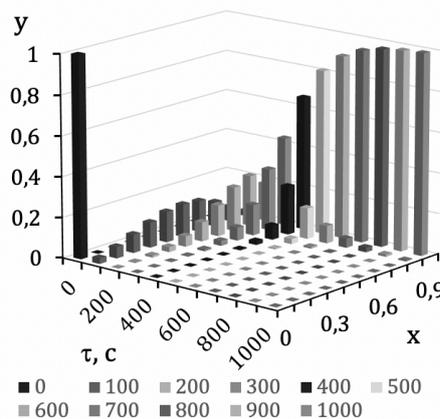
Выполнен анализ влияния параметров процесса капсулирования на равномерность покрытия [8]. Показано, что увеличение коэффициента  $k_\lambda$  приводит к улучшению равномерности покрытия частиц. Это достигается увеличением расхода раствора покрывающего вещества, снижением диаметра капель, производимых форсункой. Уменьшение расхода частиц  $G_\phi$  через зону орошения (уменьшение коэффициента  $k_c$ ) приводит к ухудшению равномерности покрытия частиц при фиксированном времени обработки.

При моделировании периодического процесса капсулирования [9] решение системы уравнений (3), (4) с учетом (7) численным методом напрямую весьма затруднительно, поскольку она представляет собой жесткую систему дифференциальных уравнений. Значение константы  $k_\phi$  на 2-3 порядка больше  $k_c$ . Упростить задачу можно приняв физические допущения о квазистационарности процесса формирования покрытия в зоне орошения форсункой. Принимая  $\partial\psi(x, \tau)/\partial\tau \approx 0$ , получаем следующую систему уравнений относительно функции распределения частиц по степени покрытия в псевдооживленном слое при нестационарном режиме работы:

$$\frac{\partial f(x, \tau)}{\partial \tau} = k_c \psi(x, \tau) - k_c f(x, \tau) \quad (22)$$

$$k_\lambda \frac{\partial [(1-x)\psi(x, \tau)]}{\partial x} = k_\phi f(x, \tau) - k_\phi \psi(x, \tau). \quad (23)$$

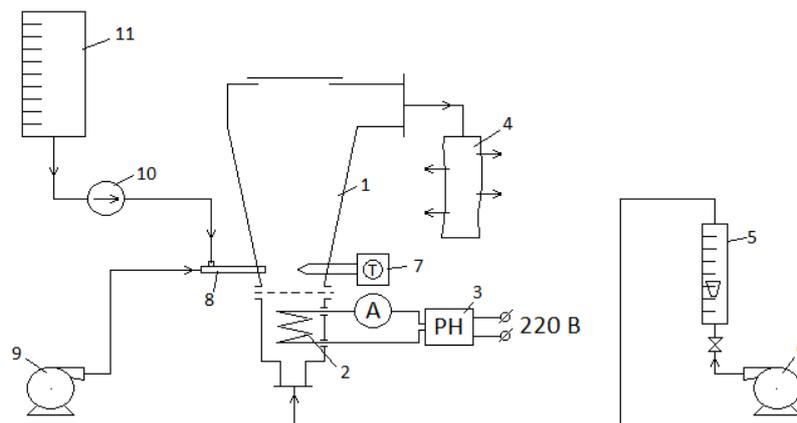
Решение системы уравнений (14), (15) осуществлялось конечно-разностным методом [10]. Результаты вычислительного эксперимента представлены ниже. Вводится обозначение  $y$  – доля частиц, имеющих степень покрытия  $x$  в заданном интервале. На гистограмме рис. 6 диапазон изменения степени покрытия от 0 до 1 разбит на 10 равных интервалов с шагом 0,1. В начальный момент времени ( $\tau=0$ ) в аппарате находятся исходные гранулы ( $x=0$ ), то есть доля частиц  $y$ , имеющих степень покрытия в интервале от 0 до 0,1 равна 1 ( $y=1$ ). Через 100 секунд 2,8 % частиц имеют степень покрытия в интервале [0,0-0,1], 5,7 % в интервале [0,1-0,2], 9,1% в интервале [0,2-0,3] и т.д. Вычислительный эксперимент показал, что время, необходимое для полного покрытия всех частиц, при заданных параметрах процесса, составляет 1000 с, что иллюстрирует рис. 6.



**Рисунок 6** — Эволюция во времени распределения частиц по степени покрытия.

$$k_c=0,066; k_\lambda=2; k_\phi=15,9$$

Экспериментальные исследования процесса капсулирования проводились на установке, схема которой приведена на рис.7.



**Рисунок 7** — Схема лабораторной установки:

- 1 - аппарат кипящего слоя, 2 - электронагреватель, 3 - регулятор напряжения, 4 - рукавный фильтр, 5 - ротаметр, 6 - газодувка, 7 - измеритель температуры, 8 - форсунка, 9 - мембранный компрессор, 10 - насос-дозатор, 11 - емкость раствора капсулянта

Воздух, подаваемый на псевдооживление, нагревается электронагревателем 2. Регулирование температуры воздуха осуществляется путем изменения силы тока через спираль электронагревателя с помощью регулятора напряжения 3. Атмосферный воздух подается в электронагреватель газодувкой 6. Для контроля за расходом воздуха предусмотрен

ротаметр 5. Интенсивное движение частиц в аппарате 1 в режиме фонтанирующего слоя может стать причиной их истирания. Для очистки воздуха выходящего из аппарата от пылевидной фракции обрабатываемого продукта предусмотрен рукавный фильтр 4. Тонкодисперсный распыл эмульсии полимера обеспечивается пневматической форсункой 8. Эмульсия полимера дозируется в форсунку из емкости 11 насосом 10 перистальтического типа. Сжатый воздух подается в форсунку с помощью мембранного компрессора 9. Для контроля температуры слоя частиц в аппарате установлен измеритель температуры 7 типа УКТ-38. В качестве датчика температуры используется термопара.

На описанной выше установке получены образцы капсулированных минеральных удобрений. На рис. 8 приведена фотография среза гранулы, полученная на электронном сканирующем микроскопе TESCAN VEGA3. В слое покрытия нет дефектов, толщина покрытия достаточно равномерная. Среднее значение толщины слоя покрытия гранулы карбамида 0,08 мм, азофоски 0,194 мм.

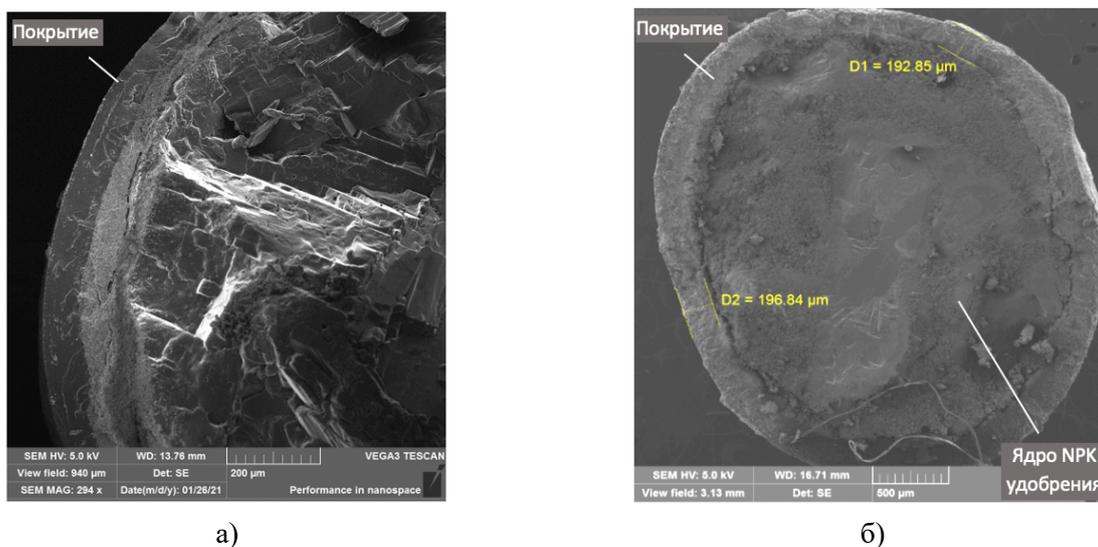


Рисунок 8 — SEM изображения среза капсулированной гранулы карбамида (а) и азофоски (б)

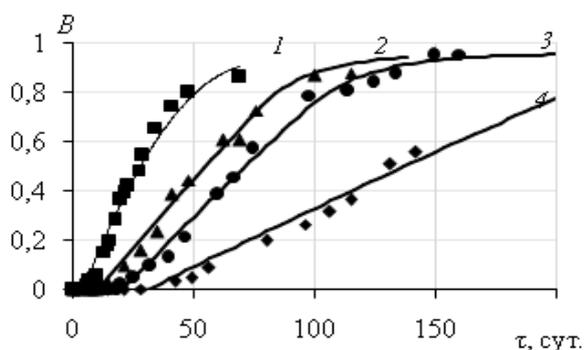


Рисунок 9 — Изменение степени выделения питательных веществ из капсулированных гранул азофоски во времени. Массовая доля оболочки, %: 1 – 16; 2 – 20; 3 – 23; 4 – 26

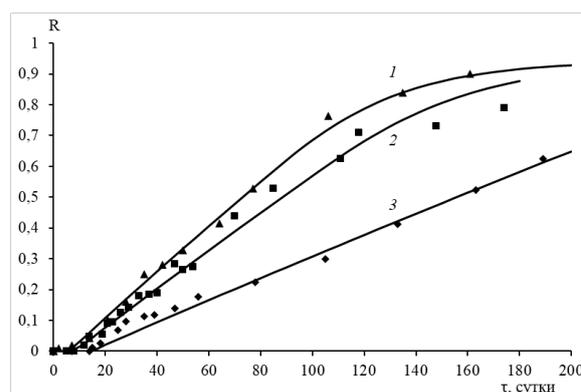


Рисунок 10 — Изменение степени выделения карбамида из капсулированных гранул во времени. Массовая доля оболочки, %: 1 – 20; 2 – 23; 3 – 26

На рисунках 9, 10 приведены профили высвобождения целевых компонентов из капсулированных гранул при различных относительных массах оболочки [11,12]. Под относительной массой оболочки понимается отношение массы капсулы к массе растворимого ядра. С возрастанием относительной массы оболочки увеличивается и толщина слоя

покрытия. Графики иллюстрируют возможность регулирования продолжительности действия удобрений путем изменения толщины защитной оболочки.

### **Выводы**

В качестве количественного критерия однородности слоя покрытия предложено использовать величину степени покрытия, которая может быть определена как доля покрытой поверхности гранул. Разработана математическая модель процесса нанесения покрытия в псевдооживленном слое, позволяющая рассчитать интегральные функции распределения гранул по степени покрытия. Аналитически решена задача расчета функции распределения по степени покрытия в стационарном режиме процесса нанесения покрытия для односекционного аппарата. Предложен алгоритм численного расчета функции распределения для многосекционного аппарата. Для периодического режима работы аппарата составлена система уравнений для расчета функции распределения по степени покрытия в любой момент времени. Выполнен анализ влияния параметров процесса капсулирования на равномерность покрытия. Спрогнозированные рациональные параметры процесса нанесения покрытия использованы при осуществлении капсулирования гранул минеральных удобрений в аппарате с псевдооживленным слоем. Получены качественные покрытия, позволяющие регулировать скорость выделения питательных веществ.

*Исследование проведено с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием ИГХТУ (при поддержке Минобрнауки России, соглашение № 075-15-2021-671).*

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Abdul Halim Z. A. Dispersion of polymeric-coated–silica aerogel particles in unsaturated polyester composites: Effects on thermal-mechanical properties // Journal of Dispersion Science and Technology. 2018. V. 39. N 8. P. 1093-1101.
2. Гайдамакин В. Н. Капсулированные продукты для защиты нефтепромыслового погружного оборудования от солеотложений // Современные инновации. 2018. № 3. с.5-7.
3. Tolve R. Encapsulation of health-promoting ingredients: applications in foodstuffs // International Journal of Food Sciences and Nutrition. 2016. V. 67. N 8. P. 888-918.
4. Будков В.А., Пухальская Н.В. Дражирование семян сельскохозяйственных культур // Плодородие. 2009. № 2. С. 17-19.
5. Липин А.Г., Небукин В.О., Липин А.А. Капсулирование гранул в полимерные оболочки как метод создания минеральных удобрений с регулируемой скоростью высвобождения питательных веществ // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. 2017. № 3 (51). С. 86-91.
6. Овчинников Л. Н., Липин А.Г. Капсулирование минеральных удобрений во взвешенном слое: монография. ФГБОУ ВПО Иван. гос. хим.-технол. ун-т. Иваново. 2011. 140 с.
7. Gibbs B.F. Encapsulation in the food industry: A review // International Journal of Food Sciences Nutrition. 1999. V 50. N 3. P. 213-224.
8. Lipin A. G., Lipin A. A. & Wójtowicz R. Calculation of degree of coverage in fluidized bed coating // Drying Technology. 2022. V. 40. N 1. P. 30-41.
9. Lipin A.A., Lipin A.G. Prediction of coating uniformity in batch fluidized-bed coating process // Particuology. 2022. V. 61. P. 41-46.
10. Липин А.Г., Липин А.А. Прогнозирование равномерности нанесения покрытия при капсулировании в многосекционном аппарате с псевдооживленным слоем // Промышленные процессы и технологии. 2022. Т. 2. № 1. С. 39-49.
11. Липин А.Г., Липин А.А. Кинетика высвобождения азота из гранул мочевины с полимерным покрытием // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2022. Т. 65. Вып. 7. С. 100-106.
12. Липин А.А., Липин А.Г. Кинетика высвобождения питательных веществ из гранул NPK удобрения с полимерным покрытием // Вестник ТГТУ. 2022. Т. 28. №3. С. 466-475.

**ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ  
ТЕХНОЛОГИЙ В ХИМИЧЕСКОЙ И СМЕЖНЫХ ОТРАСЛЯХ  
ПРОМЫШЛЕННОСТИ**  
**PROSPECTS FOR THE APPLICATION OF MODERN INFORMATION TECHNOLOGIES  
IN THE CHEMICAL AND RELATED INDUSTRIES**

**Олег Иванович Седяров, Егор Владимирович Отрубянников**  
**Oleg I. Sedlyarov, Egor V. Otrubyannikov**

*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:* В работе рассмотрены современные подходы к цифровизации производственного процесса. Отмечены причины слабой цифровизации химической отрасли. Рассмотрен жизненный цикл продукта в контексте модельно-ориентированного проектирования. Рассмотрены этапы цифровой трансформации и формирования цифрового двойника. Показано влияние цифровой нити на формирование единого информационного пространства предприятия. Рассмотрен метод модельно-ориентированного проектирования по отношению к химической отрасли. Отмечено практическое отсутствие открытого программного обеспечения для имитационного моделирования, а также механизмов информационного обмена между существующими решениями.

*Abstract:* The work discusses modern approaches to digitalization of the production process. The reasons for the weak digitalization of the chemical industry are noted. The product life cycle is considered in the context of model-based design. The stages of digital transformation and the formation of a digital twin are considered. The influence of the digital thread in the formation of a unified information space of the enterprise is shown. The method of model-based design in relation to the chemical industry is considered. The practical absence of open software for simulation modeling, as well as mechanisms for information exchange between existing solutions, was noted.

*Ключевые слова:* цифровой двойник, модельно-ориентированное проектирование, цифровая нить, открытое программное обеспечение.

*Keywords:* digital twin, model-based design, digital thread, open source software.

Цифровизация и цифровая трансформация рассматривается в современном мире как ключевая потребность производственного предприятия. Цифровая трансформация повышает конкурентоспособность производств и позволяет гибко адаптироваться к изменениям и потребностям рынка. Пандемия COVID-19 показала, что цифровые технологии могут обеспечивать жизнеспособность предприятий даже в чрезвычайных условиях. Как показал опрос химических компаний, проведенный после пандемии [1-2], количество проектов цифровизации возросло в среднем на 12%, что большинство опрошенных связывают с нарушившимися цепочками сбыта и поставок. Однако большинство опрошенных отмечает низкий уровень цифровизации химической отрасли и связывает это с целым рядом проблем: отсутствие необходимой инфраструктуры, вопросы безопасности, высокий уровень инвестиций, неочевидные выгоды, отсутствие необходимого персонала и др.

Проведенный опрос [1] показал, что большинство руководителей компаний химической отрасли в ближайшие 3 года (опрос проводился в 2022 году) ожидают улучшения в следующих бизнес-процессах, по убыванию значимости:

- 1) Планирование поставок;
- 2) Автоматизация продаж;
- 3) Закупки;

- 4) Поддержка потребителя;
- 5) Качество продукции;
- 6) Логистика;
- 7) Промышленные выбросы.

Если рассмотреть структуру производственного предприятия, то все процессы в жизненном цикле предприятия упрощённо можно классифицировать на экономические и технологические. Очевидно, что из перечисленного только качество продукции и промышленные выбросы могут быть отнесены к технологическим процессам. За этим скрывается непонимание большинства руководителей реальных преимуществ и возможностей процесса цифровизации, что приводит к внедрению цифровых решений в локальных бизнес-процессах, преимущества которых очевидны и доступны. В свою очередь инвестиции в научно-исследовательскую деятельность или разработку специализированного программного обеспечения не столь очевидны и несут финансовые риски. Стоит отметить, что в период до пандемии COVID-19 многие руководители компаний отмечали отсутствие положительных примеров цифровизации именно в химической отрасли [2], что ставит под вопрос эффективность таких капиталовложений. При этом в тот же период 38% опрошенных руководителей утверждали, что полностью осознают влияние цифровизации на предприятие [3].

Вышеуказанные причины по большей части являются основополагающими в отсутствии готовых цифровых решений для химической промышленности. Наличие в России доступных механизмов автоматизации экономической составляющей предприятия, предоставляемые, например, компанией «1С», фактически упрощает понятие цифровизации для большинства руководителей. Оценку этого можно провести по рекомендациям самой компании «1С» для химических производств — в рекомендациях предлагаются типовые конфигурации, реализующие базовые экономические процессы [4]: несколько видов учёта, взаимодействие с клиентами, продажи, бюджетирование, управление кадрами. В то же время в смежной пищевой промышленности, помимо типовых конфигураций, фирма 1С предлагает целый ряд отраслевых, которые автоматизируют конкретную технологию производства [5]: мясопереработку, молочные производства, хлебобулочные производства, производство алкоголя и т.д. Данные отраслевые решения имеют технологическую специфику, что позволяет повысить уровень цифровизации именно в производственной составляющей предприятия, лежащей в основе жизненного цикла продукта или системы (рис. 1).

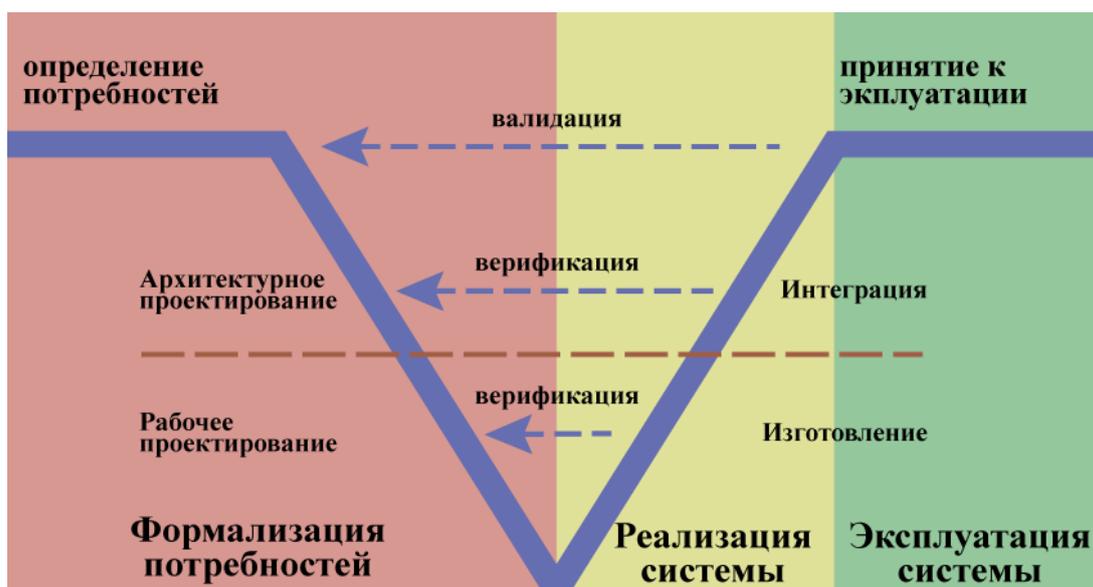


Рисунок 1 — Упрощённая V-диаграмма жизненного цикла продукта [6].

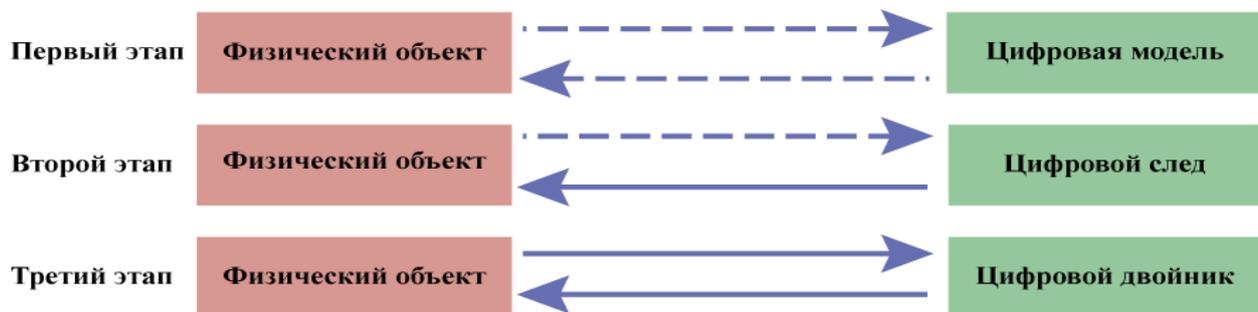
Представленная на рисунке 1 диаграмма является своего рода стандартом представления жизненного цикла продукта, характеризующего каждый из этапов: проектирование, создание и эксплуатацию продукта или системы. Переосмысление данной диаграммы с точки зрения модельно-ориентированного проектирования предложено компанией Боинг [7]. В основе данного подхода к проектированию лежат модели, как неотъемлемая часть информационного сопровождения всего жизненного цикла продукта или системы.



**Рисунок 2** — Сопоставление этапов жизненного цикла и вопросов, стоящих перед цифровым двойником [7].

Как показывает практика, под цифровым двойником понимается множество различных форм цифровизации процессов, каждый из которых может рассматриваться как отдельная модель, но называть все формы отражения реальных процессов в виртуальном мире цифровыми двойниками некорректно.

Цифровой двойник формируется в несколько этапов [8], которые по своей сути являются цифровой трансформацией бизнеса. При этом цифровая трансформация — это не только отказ от аналоговых технологий, но и организационные изменения предприятия для эффективной эксплуатации цифровой составляющей бизнеса.



**Рисунок 3** — Этапы формирования цифрового двойника [8].

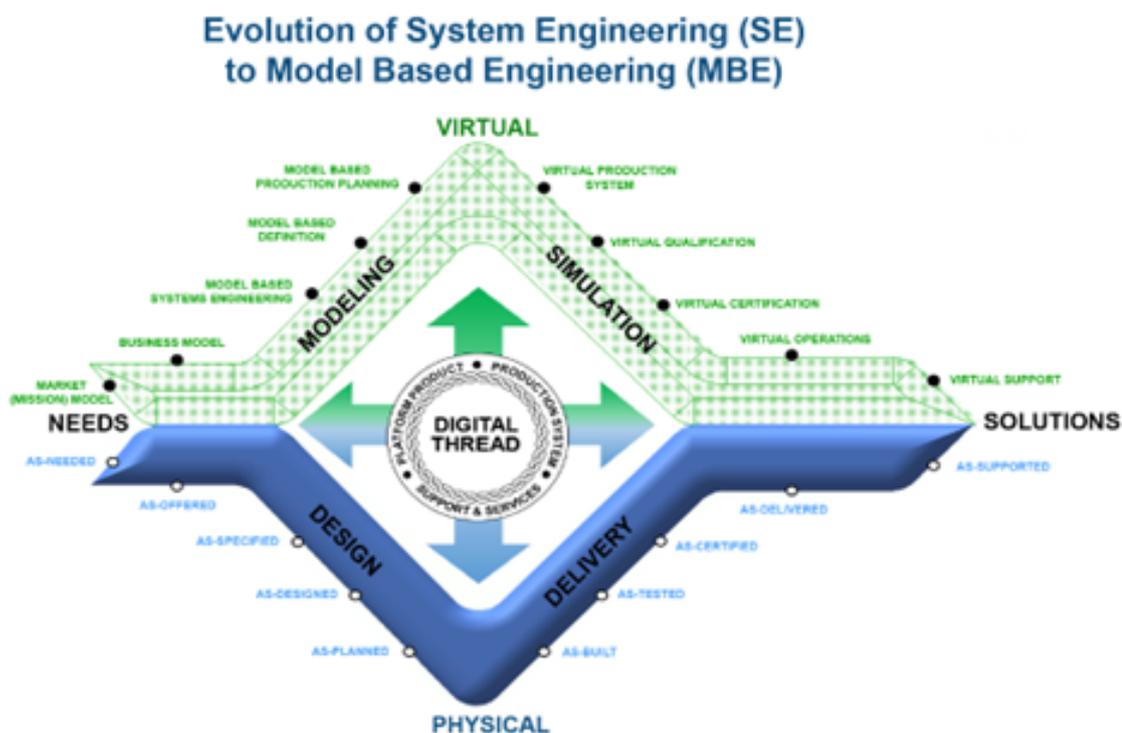
На первом этапе формируется цифровая модель физического объекта, связанная цифровой нитью с этим физическим объектом. Цифровая нить [9] — это архитектура движения данных, которая связывает воедино информацию, создаваемую на протяжении всего жизненного цикла продукта, и она является основной коммуникационной платформой для всех продуктов компании в любой момент времени. Стоит отметить, что цифровая нить включает в себя нативный механизм версионирования, который подразумевает хранение данных по всему времени эксплуатации продукта или системы. Информационный обмен между физическим объектом и цифровой моделью на этом этапе выполняется вручную.

На следующем этапе цифровая нить начинает одностороннюю работу в режиме онлайн. Использование датчиков позволяет актуализировать модель в реальном времени, что позволяет модели отражать важные характеристики физического объекта. Такого рода модель называется цифровой тенью или цифровым следом.

На последнем, третьем, этапе двухсторонний информационный обмен между физическим объектом и моделью выполняется в режиме реального времени, а цифровой двойник начинает оказывать управляющие воздействия на физический объект. Такого рода

взаимодействие на текущий момент видится как итоговый результат цифровой трансформации.

На рис. 4 представлена концепция V-диаграммы с точки зрения модельно-ориентированного проектирования. Классическая V-диаграмма дополняется своим виртуальным отражением, которое располагается симметрично относительно горизонтали. Каждый из этапов на виртуальном отражении представляет собой разновидность модели, характеризующий этап жизненного цикла реального продукта или системы. В работе [7] отмечается, что обе части диаграммы объединяются цифровой нитью, которая показывает единое информационное поле, создающее возможности ко всестороннему обмену.



**Рисунок 4** — Жизненный цикл продукта с точки зрения модельно-ориентированного проектирования предложенный компанией Боинг [7].

Модельно-ориентированный подход к проектированию даёт наиболее цельное представление о процессе и результатах цифровой трансформации. Применительно к химико-технологическим системам данный подход стоит рассмотреть с точки зрения существующих уровней абстракции и разрабатываемых программных решений.

При проектировании химико-технологических систем можно выделить характерные уровни рассмотрения системы и соответствующие подходы к оценке и проектированию, существенно отличающиеся как по размеру рассматриваемой системы, так и по детализации и стоимости вычислений.

Первый уровень — рассмотрение всей системы (или технологического процесса) целиком как «Черного ящика», для которого заданы входные параметры и в результате функционирования которого реализуются выходные результаты. Это, как правило, простые балансовые расчеты, очень быстрые, с минимальным количеством предоставляемой информации.

Второй уровень — моделирование процесса, при котором обычно рассматривается нестационарное решение, не связанное с пространственными характеристиками. Для этого уровня характерна умеренная детализация, что и определяет достаточную быстроту расчетов

и среднюю стоимость вычислений, что подходит для проектирования процессов для сложных установок и пилотных проектов.

Третий уровень рассмотрения — это фактически уровень отдельного аппарата для которого решаются задачи вычислительной гидродинамики, позволяющие получить максимально подробные характеристики процесса. Это нестационарные многомерные задачи с максимальной детализацией и, соответственно, высокими вычислительными затратами.

Рассматривая химико-технологический процесс с точки зрения жизненного цикла продукта, можно утверждать, что в настоящее время не существует единого решения или цепочки решений, которые позволили бы реализовать полный жизненный цикл в едином программном продукте или фреймворке. На первом этапе формирования бизнес-модели чаще всего используется Microsoft Excel, а также возможно использование типовых решений фирмы «1С». На этапе моделирования программное обеспечение представлено наиболее широко — это CAD/CAE/PDM системы, программное обеспечение для твердотельного моделирования, CFD-моделирования и специализированное программное обеспечение для моделирования химико-технологических процессов. Стоит отметить, что специализированное программное обеспечение, в частности, продукты компании Ansys, в 2020-2021 годах показывали кратный рост продаж в России, который был остановлен в 2022 году в связи с уходом компании с российского рынка. Кроме того, специализированное программное обеспечение имеет высокую стоимость и обоснование для его закупки порой является трудоёмкой задачей. На этапе моделирования представлено множество открытого программного обеспечения, в частности, на этапе подготовки модели используются Salome, FreeCAD, в качестве решателей может использоваться OpenFOAM, Code Saturne, Code Aster, Elmer, а для обработки результата может использоваться программное обеспечение Paraview и Salome. Открытое программное обеспечение имеет высокий потенциал и более стабильную базу развития, а также сформированное сообщество, которое обеспечивает поддержку программного обеспечения.

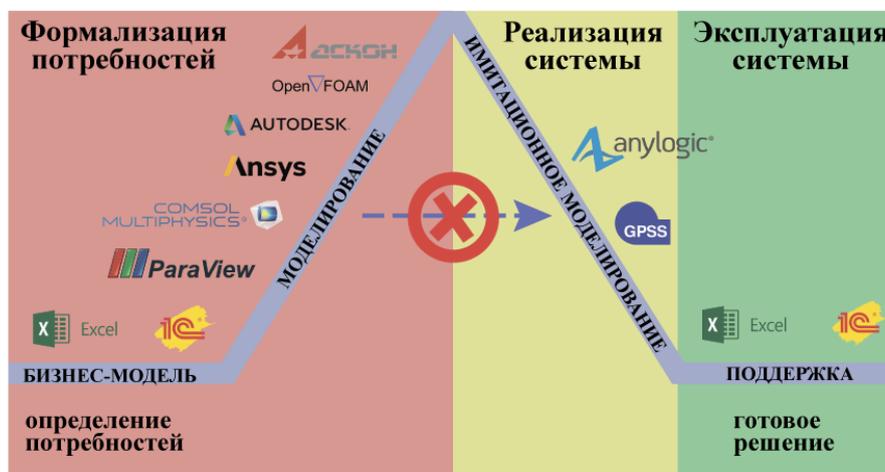


Рисунок 5 — Программное обеспечение для реализации цифровых моделей.

На этапе имитационного моделирования, при существовании как минимум прототипа продукта, выбор программного обеспечения становится более ограниченным. В современных реалиях на данном этапе функционирует или собственная разработка компании, которая отражает ограниченные параметры физического объекта под нужды конкретной задачи, или используется одна из сред имитационного моделирования, которая также реализует конкретную задачу с ограниченным набором параметров. Интеграция между этапами моделирования и имитационного моделирования ограничивается переносом графических объектов и частичным обменом базами данных. Фактически можно утверждать, что в современных реалиях данного информационного потока не существует.

Этап поддержки и реализации готового продукта в 90% случаев в России реализуется программным обеспечением «1С» и Microsoft Excel.

Осенью 2021 года в Российской Федерации был принят национальный стандарт [10], устанавливающий общее понятие цифрового двойника изделия, а также общие положения и требования по разработке и применению цифровых двойников. Этот стандарт определяет общие положения создания цифровых двойников как для вновь разрабатываемых изделий (еще не созданных), так и для ранее спроектированных или уже эксплуатируемых изделий.

Стандарт определяет цифровой двойник изделия как систему, состоящую из цифровой модели изделия и двусторонних информационных связей с изделием (при наличии изделия) и/или его составными частями. В примечании к этому определению указано, что цифровой двойник разрабатывается и применяется на всех стадиях жизненного цикла продукта [10].

Действие стандарта распространяется на изделия машиностроения, но по мнению представителей Росстандарта на его базе могут и будут разрабатываться аналогичные стандарты для других отраслей промышленности, учитывающие специфику отрасли.

ГОСТ Р 57700.21-2020 [11] определяет цифровой двойник изделия как связанную совокупность компьютерных моделей различных видов, описывающих с требуемым уровнем адекватности свойства и поведение экземпляра изделия, изменение его характеристик и внутренние процессы в зависимости от состояния внешней среды (управляющих воздействий), решаемых задач и условий их выполнения.

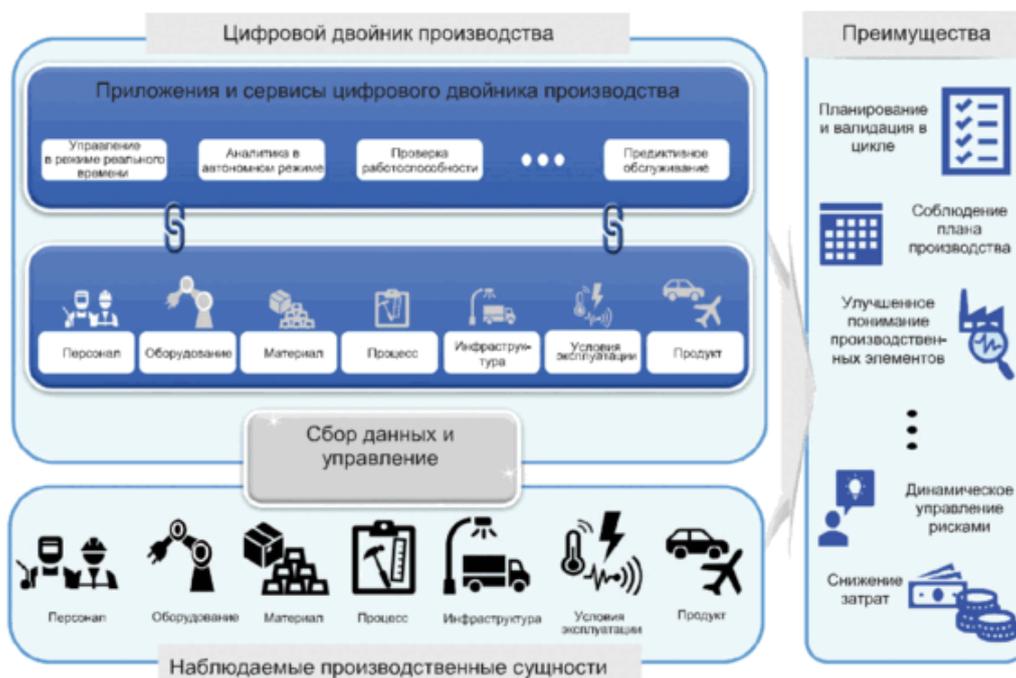
Еще одним из документов, ожидающих своего утверждения, является ПНСТ 429-2020 [12], в котором представлены общие положения и основополагающие принципы цифровых двойников производства, а также руководящие указания по созданию структуры цифровых двойников.

Цифровой двойник производства представляет собой детальное моделирование конфигураций физических сущностей и динамическое моделирование изменений продукции, процесса и ресурсов в процессе производства. Цифровой двойник производства основан на цифровой модели, которая постоянно обновляется и изменяется по мере изменения физического аналога с целью синхронного представления состояния, условий работы, конфигурации продукта и состояния ресурсов. Представление цифрового двойника производства позволяет цифровому двойнику постоянно взаимодействовать с визуальными производственными элементами путем обмена эксплуатационными данными и данными об условиях эксплуатации [12].

ПНСТ 429-2020 [12] определяет, что цифровой двойник производства представляет собой цифровую модель (рисунок 6), которая постоянно обновляется и изменяется по мере изменения физического аналога с целью синхронного представления данных о статусе, условиях работы, конфигурации продукта и состоянии ресурсов.

Реализация системы цифровых двойников производства должна иметь иерархическую структуру и реализовывать цифровые двойники на различных уровнях абстракции, начиная от уровня технологического оборудования, возможно и отдельных его частей, технологической операции, производственного участка, цеха, предприятия и т. д.

Использование цифрового двойника производства увеличивает показатели эффективности в цикле планирования и валидации, в соблюдении графика производства, улучшении понимания производственных элементов, динамическом управлении рисками, снижении затрат и т. д. [12], что должно сказаться на общей эффективности и конкурентоспособности предприятия.



**Рисунок 6** — Концепция цифровых двойников производства [12].

Помимо прочего, технология цифровых двойников позволяет подробно разобраться во всех аспектах функционирования моделируемой системы, оценить различные варианты модернизации системы без ущерба физической системе, а также наглядно представить результаты.

Как считают специалисты компании Anylogic (The AnyLogic Company), мирового лидера в производстве систем имитационного моделирования — «два ключевых элемента любых цифровых двойников — динамические имитационные модели и данные, отражающие текущее состояние реальной моделируемой системы. Благодаря этим элементам цифровой двойник становится эффективным инструментом для проведения экспериментов, анализа и наглядного представления данных».

В настоящее время ведутся активные работы по созданию цифровых двойников следующего поколения — умных цифровых двойников (Smart Digital Twin), объединяющих цифровых двойников изделия (продукта) и цифровых двойников производства в рамках единой цифровой модели. Еще одним важным моментом развития технологии цифровых двойников является формирование «умной» цифровой тени (Smart Digital Shadow), которое происходит на основе информации о функционировании конкретных образцов изделия.

Из приведенного, достаточно краткого, обзора развития технологий цифровых двойников можно сделать несколько выводов, непосредственно касающихся данной работы:

- технологии цифровых двойников будут активно развиваться и охватят все отрасли промышленности, включая химическую и смежные отрасли;
- практически отсутствует информация об использовании цифровых двойников для оценки негативного воздействия на персонал и окружающую среду.

Представленные в работе технологии имитационного моделирования могут стать основой для создания цифровых двойников практически любого уровня абстракции (станок, аппарат, технологическая операция, технологическая линия, производственный участок, цех, предприятие и т.д.) для предприятий химических и смежных отраслей промышленности, а научно-практические основы оценки и моделирования воздействия технологических процессов на производственный персонал и окружающую среду могут явиться базой для создания еще одного вида цифровых двойников – цифровых двойников среды или окружения (Digital Twin of the Environment – DToE).

В процессе функционирования цифровых двойников среды или окружения (DToE) и получении данных состояния и влияния среды произойдет формирование «умных» цифровых двойников среды или окружения (Smsrt DToE или SDToF), которые позволят совершенствовать среду в плане обеспечения безопасности на всех уровнях (рабочая зона, предприятие, селитебная территория, окружающая среда) за счет совершенствования источников опасности.

### **Выводы**

В работе рассмотрены современные подходы к формированию информационной составляющей производственного предприятия. В концепции модельно-ориентированного проектирования рассмотрены понятия цифрового двойника, цифрового следа, цифровой нити. Обоснованы причины слабой цифровизации химической отрасли, среди которых выделены:

а) плохое информирование руководителей предприятий о возможностях цифровых технологий в области технологической составляющей бизнеса;

б) нежелание делать капиталовложения в цифровизацию элементов системы не имеющих очевидной выгоды;

в) отсутствие среды для формирования единого информационно поля внутри предприятия;

г) высокая цена программного обеспечения, без очевидных преимуществ по отношению к сформированному и устоявшемуся годами процессу производства.

В ближайшие годы потребность в цифровизации не уменьшится, а значит возникает необходимость в создании единой информационной среды, включающей в себя все этапы жизненного цикла продукта. Как показывает практика проприетарного программного обеспечения, для его создания и продвижения на рынке требуется колоссальные материальные затраты, тем более это касается химической промышленности. Поэтому целесообразно создавать цифровую среду на базе открытого программного обеспечения, поддерживаемого сообществом. В настоящее время единая среда для моделирования ещё не создана, но уже имеет свои очертания и находится на этапе разработки, а главное — каждый из этапов этого процесса по отдельности уже функционирует и может использоваться в реальном производственном процессе. Хуже дела обстоят с этапом имитационного моделирования — открытое программное обеспечение практически не имеет своего сообщества и возможности адаптации данного программного обеспечения под потребности конкретной отрасли практически отсутствуют. Стоит отметить, что целый ряд российских производителей уже представляют свои разработки для данного этапа, однако без поддержки химического сообщества вероятность появления отраслевого решения мала. Особо стоит отметить, что переход на второй этап цифровой трансформации, без обеспечения интернета-вещей с учётом специфики конкретной отрасли, невозможен. Этот вопрос так же требует консолидации химического сообщества для выработки стандартов и эталонных решений. Рассмотренные тенденции развития технологии цифровых двойников позволяют предположить, что динамические имитационные модели в ближайшее время станут стандартом анализа и эксплуатации цифровых двойников. Общая тенденция к более глубокой детализации и структурированию производственных цифровых двойников, а также популяризация модельно-ориентированного подхода, позволяет предположить одновременное функционирования различных моделей на разных уровнях абстракции, которые будут объединены в умные цифровые двойники. Потребность в реализации взаимодействия умных цифровых двойников с окружающей средой, и моделями более высокого уровня абстракции, формирует необходимость в решении внешней задачи для цифрового двойника и создании цифровых двойников среды или окружения.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Jenner, F. Why the chemical industry is prioritizing digitalization [Электронный ресурс] // EY, 2022. URL: [https://www.ey.com/en\\_gl/advanced-manufacturing/why-the-chemical-industry-is-prioritizing-digitalization](https://www.ey.com/en_gl/advanced-manufacturing/why-the-chemical-industry-is-prioritizing-digitalization) (дата обращения 01.12.2023)
2. Overcoming digital transformation roadblocks in the chemical industry [Электронный ресурс] // Elsevier. 2020. URL: [https://www.elsevier.com/\\_data/assets/pdf\\_file/0011/972389/Overcoming-digital-transformation-roadblocks\\_whitepaper\\_CHEM-MAN\\_WEB.pdf](https://www.elsevier.com/_data/assets/pdf_file/0011/972389/Overcoming-digital-transformation-roadblocks_whitepaper_CHEM-MAN_WEB.pdf) (дата обращения 01.12.2023)
3. Digital Transformation & Industry 4.0 in the Chemical Industry [Электронный ресурс] // Precog. URL: <https://www.precog.co/blog/digital-transformation-industry-4-0-in-the-chemical-industry/> (дата обращения 01.12.2023)
4. Решения для отрасли: Химическая и фармацевтическая промышленность [Электронный ресурс] // URL: <https://solutions.1c.ru/chemicals> (дата обращения 01.12.2023)
5. Решения для отрасли: Пищевая промышленность [Электронный ресурс] // URL: <https://solutions.1c.ru/food-industry> (дата обращения 01.12.2023)
6. Scheithauer, D. and Forsberg, K. (2013), 4.5.3 V-Model Views. INCOSE International Symposium, 23: 502-516. <https://doi.org/10.1002/j.2334-5837.2013.tb03035.x>
7. Model based engineering (mbe) supplier integration [Электронный ресурс] // URL: <https://www.boeing-suppliers.com/modelbasedengineering.html> (дата обращения 01.12.2023)
8. Левенчук А. Методология 2022 / А. Левенчук — «Издательские решения», ISBN 978-5-00-566994-0
9. Singh, Victor; Willcox, K. E. (November 2018). "Engineering Design with Digital Thread". AIAA Journal. 56 (11): 4515–4528. doi: <https://doi.org/10.2514/1.J057255>
10. ГОСТ Р 57700.37-2021. Компьютерные модели и моделирование Цифровые двойники изделия. Общие положения: национальный стандарт Российской Федерации: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 16 сентября 2021 г. N 979-ст: дата введения 2022-01-01. – Текст: электронный // Электронный фонд нормативно-технической и нормативно-правовой информации Консорциума «Кодекс» [сайт]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200180928> (дата обращения: 20.09.2021).
11. ГОСТ Р 57700.21-2020. Компьютерное моделирование в процессах разработки, производства и обеспечения эксплуатации изделий. Термины и определения: национальный стандарт Российской Федерации: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 18 ноября 2020 г. N 1131-ст: введен впервые: дата введения 2021-06-01. – Текст: электронный // Электронный фонд нормативно-технической и нормативно-правовой информации Консорциума «Кодекс» [сайт]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/573115942> (дата обращения: 20.09.2021).
12. ПНСТ 429-2020. Умное производство. Двойники цифровые производства. Часть 1. Общие положения: предварительный национальный стандарт Российской Федерации: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 7 августа 2020 г. N 38-пнст: срок действия с 2021-01-01 до 2024-01-01. – Текст: электронный // Электронный фонд нормативно-технической и нормативно-правовой информации Консорциума «Кодекс» [сайт]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200174728> (дата обращения: 20.09.2021).

## СОПРЯЖЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ MATING PROCESSES IN CHEMICAL TECHNOLOGY

Леонид Владимирович Равичев, Светлана Игоревна Ильина  
Leonid V. Ravichev, Svetlana I. Ilina

*Российский химико-технологический университет имени  
Д. И. Менделеева, Россия, Москва  
Mendeleev University of Chemical Technology, Russia, Moscow  
(e-mail: ravichev.l.v@muctr.ru, ilina.s.i@muctr.ru)*

*Аннотация:* В представленной работе проведен анализ истории возникновения и становления курса процессов и аппаратов химической технологии. Отмечено, что в настоящее время используется классификация процессов, данная И.А. Тищенко, причём она не учитывает процессы, проходящие под действием электрического тока. Авторы обращают внимание на то, что в химической технологии не являются редкостью процессы, сопряженные с разностью электрических потенциалов, и разработка универсального описания их протекания дополнит общую картину явлений переноса рассматриваемых в курсе «Процессы и аппараты химической технологии».

*Abstract:* In the presented work, the analysis of the history of the appearance and formation of the course of chemical engineering is carried out. It is noted that the classification of processes given by I.A. Tishchenko is currently used, and it does not take into account the processes taking place under the influence of electric current. The authors draw attention to the fact that processes involving electrical potential differences are not uncommon in chemical technology, and the development of a universal description of their course will complement the overall picture of the transfer phenomena considered in the course "Processes and devices of chemical technology".

*Ключевые слова:* классификация процессов, сопряженные процессы, уравнения переноса, перенос заряда.

*Keywords:* classification of processes, coupled processes, transport equations, charge transfer.

Общие закономерности в химической технологии, как необходимые составляющие развития производства, были изложены Д.И. Менделеевым ещё в 1897 году в книге «Основы фабрично-заводской промышленности» [1]. В своём труде Д.И. Менделеев выделил основные «приёмы» (процессы) промышленности и химической технологии в частности: механические; физические; химические; физиологические; торговые; эстетические; экономические; общественно-государственные.

Первые три типа процессов, по классификации Д.И. Менделеева, почти полностью отражают современное содержание курса процессов и аппаратов химической технологии:

1. Механические – смешение; измельчение; давление; стругание; просеивание; отжатие; передвижение жидких, твердых и газообразных тел; пульверизация жидкостей.

2. Физические – нагрев; плавление; сушка; выпаривание; перегонка; ожижение; отливка; **действие тока.**

3. Химические – распад и образование растворов; диссоциация; кристаллизация; сплавообразование; сухая перегонка; соединение; горение; химический анализ и синтез.

Показательно, что, разбирая процессы, Д.И. Менделеев говорил о неразрывности применения на практике различных физических и химических методов (или приёмов) не только дополняющих друг друга, но и совместно реализующих процесс, невозможный при использовании каждого метода в отдельности. Таким образом, можно сказать, что кроме первичной общей классификации Дмитрий Иванович указал на сопряжённость физико-химических процессов и явлений («Введение», [1]).

Позднее его труд был взят за основу И.А. Тищенко, который в 1913-1914 годах выпустил двухтомник «Основные процессы и аппараты химической технологии», который в дальнейшем явился базой для формирования курса «Процессы и аппараты химической технологии».

В настоящее время курс процессов и аппаратов химической технологии включает в себя следующие основные разделы:

- механические процессы,
- гидромеханические процессы,
- тепловые процессы,
- массообменные процессы.

В процессах химической технологии часто имеет место сопряжение процессов, то есть явление, при котором один процесс энергетически обеспечивает протекание другого. Например, теплообменные и массообменные процессы включают в себя реализацию определенного гидродинамического режима, а процессы простой перегонки и ректификации относят к совмещенным тепло- массообменным процессам.

В связи с этим возникает вопрос о видах энергетического обеспечения процессов, которых, в общем достаточно много (тепловая, ядерная, электрическая и др.), однако, в курсе процессов и аппаратов химической технологии в основном делается упор на тепловую энергию.

Возвращаясь к началу, а именно, к труду Д.И. Менделеева, хотелось бы отметить, что одним из физических видов процесса по классификации Д.И. Менделеева является «действие тока». Более того, электричество названо им «венцом усилий науки и промышленности». Ни для кого не секрет, что электрохимия представляет целое направление химической технологии, но в курсе процессов и аппаратов нет раздела, посвященного переносу заряда или электропереносу. Таким образом, большое количество процессов, задействованных в химической технологии, протекающие под действием энергии разности потенциалов (к которым относятся и электролиз, электродиализ, электрофлотация) не рассматриваются в курсе процессов и аппаратов химической технологии.

Подтверждением необходимости учета электрических характеристик в химических процессах является и то, что все процессы идут до выравнивания электрохимических потенциалов (куда входит и величина разности электрических потенциалов).

Также стоит отметить, что все электрохимические процессы фактически являются сопряженными процессами, так как либо идут параллельно с переносом массы (например, электролиз), либо сопровождаются выделением тепла. В связи с этим, актуальной становится задача моделирование процесса электропереноса в электрохимических процессах. Одним из уравнений, используемых для описания таких процессов, является уравнение Нернста-Планка, однако, в нем много неучтенных факторов существенно ограничивающих область его применения.

В настоящее время в публикациях по теоретической физике, неравновесной термодинамике и моделированию процессов можно встретить разделы, посвященные аналогии процессов переноса электричества с другими процессами переноса – импульса, тепла и массы [2-4]. Такой подход ограничен представлением закона Ома или уравнением переноса субстанции для соответствующего потенциала переноса, что не даёт картины общности с процессами, описываемыми уравнениями Навье-Стокса, Фурье-Кирхгофа и конвективной диффузии.

Анализ протекающих процессов позволяет получить уравнение переноса заряда в следующем виде:

$$\frac{\partial \rho_v}{\partial \tau} + \operatorname{div} \bar{\omega} \rho_v = b \operatorname{div} \operatorname{grad} \rho_v, \quad (1)$$

где  $\rho_v$  – плотность заряда, [Кл/м<sup>3</sup>],  $\tau$  – время, с,  $\omega$  – скорость, м/с,  $b$  – коэффициент зарядопроводности, м<sup>2</sup>/с.

Здесь

$$b = \frac{\sigma}{C_m \rho},$$

$\sigma$  – удельная электропроводность, См/м,  $C_m$  – удельная емкость (емкость, отнесенная к массе среды), Кл/В·кг,  $\rho$  – плотность среды, кг/м<sup>3</sup>.

Далее, ряд проделанных математических преобразований, приводит к уравнению

$$\frac{\partial \rho_v}{\partial \tau} + \omega_x \frac{\partial \rho_v}{\partial x} + \omega_y \frac{\partial \rho_v}{\partial y} + \omega_z \frac{\partial \rho_v}{\partial z} = b \nabla^2 \rho_v, \quad (2)$$

схожее по своему виду с уравнением Фурье-Киргофа (или конвективной теплопроводности):

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + \omega_x \frac{\partial T}{\partial x} + \omega_y \frac{\partial T}{\partial y} + \omega_z \frac{\partial T}{\partial z} = a \nabla^2 T, \quad (3)$$

где  $T$  – температура, К,  $a$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с.

Вследствие аналогичности вида уравнение (2) названо нами *уравнением конвективной электропроводности*.

Показательно, что выделенный нами коэффициент «зарядопроводности» имеет ту же размерность, что и кинематический коэффициент вязкости, коэффициент температуропроводности и коэффициент диффузии, что ещё раз подтверждает общность всех законов явлений переноса.

Стоит отметить, что исходя из методов решения, используемых в моделировании, для процессов, связанных с переносом заряда, также можно применять теорию подобия, используя совокупность гидродинамических, тепловых и диффузионных критериев.

На первый взгляд такой подход может противоречить «классическим» законам переноса электричества, однако нельзя отрицать тот факт, что преобразование уравнения (1) при условии стационарности процесса (электростатике)

$$\frac{\partial \rho_v}{\partial \tau} = 0,$$

и однородности рассматриваемого участка:

$$\operatorname{div} \bar{\omega} \rho_v = 0,$$

приводит к уравнению Лапласа, используемое для описания электростатического поля

$$\operatorname{div} \operatorname{grad} \varphi = 0, \quad (4)$$

Таким образом, полученное уравнение конвективной электропроводности подтверждает возможность общего подхода к описанию явлений переноса по принятым в курсе процессов и аппаратов химической технологии «канонам», используя при этом базовые законы электротехники.

Возможность единого универсального описания, на наш взгляд, позволит включить процессы, связанные с переносом электрического заряда, в курс процессов и аппаратов химической технологии, что расширит возможности расчетов и моделирования сопряженных процессов (как мы отмечали, что электрические процессы – это все сопряженные процессы) и научно обоснованному проектированию аппаратов, в которых эти процессы протекают.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Менделеев Д.И. Основы фабрично-заводской промышленности Выпуск 1-й./ Д.И. Менделеев – С.-Петербург: Издание Д. Менделеева, 1897. – 201 с.
2. Байков В.И. Теплофизика. В 2 т. Т.2. Термодинамика необратимых процессов, теория конвективного теплообмена, перенос энергии теплового излучения, процессы переноса и фазовые превращения в твердых телах/ В.И. Байков, Н.В. Павлюкевич, А.К. Федотов, А.И. Шнип. – Минск: Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси, 2014. – 370 с.
3. Ефремов Г.И. Моделирование химико-технологических процессов/ Г.И. Ефремов. 2-е изд., испр. и доп. – М.: НИЦ ИНФРА-М, 2021. – 260 с.
4. Саранин В.А. Устойчивость равновесия, зарядка, конвекция и взаимодействие жидких масс в электрических полях/ В.А. Саранин. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2009. – 332 с.

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»,  
ПОСВЯЩЁННЫЙ 120-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ П. Г. РОМАНКОВА  
(ISTS«EESTE-2024»)**

ПРОГРАММА И МАТЕРИАЛЫ ПЛЕНАРНОЙ СЕССИИ

20–22 февраля 2022 года

Технический редактор Бородина Е. С.  
Компьютерная верстка и макет Бородина Е. С.

**Материалы публикуются в авторской редакции.**