

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Российский государственный университет
им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)»
(ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина»)

На правах рукописи



ЦИНЦАДЗЕ МАРИНА ЗИЕВНА

**ПОВЫШЕНИЕ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ПРОМЫВКИ
ХЛОПЧАТОБУМАЖНЫХ ТКАНЕЙ С ВОЗДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСНОГО
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ**

Специальность 2.6.16.

Технология производства изделий текстильной и лёгкой промышленности

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук,
доцент Кошелева М.К.

Москва – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИЗУЧАЕМОГО ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	11
1.1. Хлопчатобумажная ткань как объект технологической обработки в отделочном производстве текстильных предприятий.....	11
1.2 Механизм массопереноса при промывке. Задачи диффузии и массопроводности и оценка кинетического режима экстрагирования технологических загрязнений (промывки).....	24
1.3 Определение коэффициентов массопереноса в хлопчатобумажных тканях на основе кинетических кривых сорбционного увлажнения	35
1.4 Интенсификация процесса промывки хлопчатобумажных тканей.....	38
1.5 Особенности массопередачи при электроразрядном экстрагировании	58
Цели и задачи исследования	61
ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОМЫВКИ ТКАНЕЙ.....	64
2.1 Математическое описание интенсифицированного импульсным полем процесса экстрагирования технологических загрязнений из плоских волокнистых материалов.....	64
2.2 Аппроксимация изотерм сорбции волокнистых материалов различными уравнениями.....	69
2.3 Расчёт концентрации сорбированного хлопковым волокном загрязнения с учётом условий равновесия, рабочих концентраций пропиточного раствора и др.	74
Анализ результатов теоретических исследований	76
ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ	77
3.1 Характеристика объекта исследования.....	77
3.2 Описание лабораторной установки и методик экспериментального	

исследования по изучению кинетики процесса промывки.....	84
3.3. Оценка эффективности воздействия ИЭП на кинетику процесса промывки хлопчатобумажных тканей.....	98
Выводы по главе.....	104
ГЛАВА 4. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА ПРОМЫВКИ ИЭП.....	105
4.1 Практические рекомендации по интенсификации массообменных процессов импульсным электрическим полем	105
4.2 Экологическая и производственная безопасность и энергоресурсоэффективность интенсификации процесса промывки импульсным электрическим полем	108
4.3 Оценка экономической эффективности интенсификации процесса промывки ИЭП.....	114
Выводы по главе.....	125
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	127
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	129
ПРИЛОЖЕНИЕ А	151
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	152
ПРИЛОЖЕНИЕ В	153
ПРИЛОЖЕНИЕ Г.....	154

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Решение задачи снижения энерго- и ресурсоёмкости в текстильной отрасли и обеспечение рационального и экологически безопасного использования энергии и сырьевых ресурсов невозможно без совершенствования процесса промывки, в значительной степени определяющего качественные показатели готовых текстильных материалов. По затратам рабочего времени, размерам занимаемых площадей, количеству потребляемой энергии, воды и химических реагентов (прежде всего поверхностно-активных веществ - ПАВ) именно процессы промывки являются одними из самых распространённых и ресурсоёмких на текстильных предприятиях. Для отделки 1000 кг хлопчатобумажной ткани расходуется от 85 до 150 кубометров чистой воды, при этом более 80% её попадают в стоки, что негативно отражается на экологических показателях производства.

Задача повышения эффективности процесса промывки, включая интенсификацию (определяет скорость и продолжительность процесса, а значит, производительность), экологической и производственной безопасности, экономичности, при сохранении качества целевого продукта, является актуальной. Интенсификация процесса промывки тканей воздействием импульсных физических полей, в том числе импульсным электрическим полем, является одним из перспективных направлений решения данной задачи. При этом необходимы обоснование выбора способа интенсификации, параметров интенсифицирующего воздействия, проведение экспериментальных исследований, количественная оценка воздействия, математическое описание интенсифицированного процесса. Указанные исследования проведены в работе применительно к процессам промывки хлопчатобумажных тканей после мерсеризации в отделочном производстве текстильных фабрик. Интенсификация проводилась с использованием импульсного электрического поля (ИЭП). Хлопчатобумажные ткани выбраны с учётом их значимости и удельного объёма в производстве текстильных материалов.

В области исследований диссертационная работа соответствует пунктам:

1. Инновационное развитие технологий первичной обработки и переработки волокон и производства нитей, материалов и изделий текстильной и лёгкой промышленности (ИТЛП); 6. Разработка малоотходных, энергосберегающих, экологичных технологий производства и первичной обработки текстильных материалов и сырья; 28. Экологические проблемы производства материалов и ИТЛП паспорта научной специальности 2.6.16 «Технология производства изделий текстильной и легкой промышленности».

Исследования проводились на кафедре энергоресурсоэффективных технологий, промышленной экологии и безопасности (ЭТПЭБ), в рамках научно-исследовательских работ РГУ им. А.Н. Косыгина на 2019-23 гг., тема 2.11 «Разработка энергоэффективных экологически безопасных промышленных технологий».

Степень научной разработанности избранной темы. Исследованию классических процессов экстрагирования и их интенсификации, вопросам массопереноса в системах с твердой фазой, а также совершенствованию технологии промывки и других процессов отделки текстильных материалов, улучшению их экологичности и энергоресурсоэффективности уделялось значительное внимание в научных трудах таких отечественных авторов как Г.А. Аксельруд, Е.Л. Владимирцева, М.И. Давидзон, В.Т. Казуб, М.К. Кошелева, Г.Е. Кричевский, В.Б. Кузнецов, Б.Н. Мельников, О.И. Одинцова, М.А. Промтов, Н.Б. Рашковская, В.А. Реутский, П.Г. Романков, С.П. Рудобашта, Б.С. Сажин, В.В. Сафонов, В.И. Смирнов, В.Н. Хмелёв, О.Г. Циркина, А.В. Чешкова, В.И. Чурсин, А.И. Щёголев и др.

Работы по повышению экологичности и ресурсоэффективности процесса промывки тканей при интенсификации импульсным электрическим полем (ИЭП) не проводились и представляют значительный научный и практический интерес.

Объектами исследования являются процессы промывки отделочного производства текстильных фабрик, оценка их экологической безопасности и энергоресурсоэффективности.

Предмет исследования – процесс промывки хлопчатобумажных тканей после мерсеризации, способы его интенсификации, хлопчатобумажные ткани и их свойства.

Целью диссертации является повышение и оценка эффективности процесса промывки хлопчатобумажных тканей с воздействием импульсного электрического поля.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие **задачи**:

- обоснован выбор объекта исследования и метода интенсификации процесса промывки на основе анализа отечественных и зарубежных работ;
- проведена оценка и аппроксимация сорбционных характеристик хлопчатобумажных тканей;
- выполнены экспериментальные исследования кинетики процесса промывки, в том числе с ИЭП;
- дана количественная оценка интенсифицирующего эффекта от воздействия ИЭП на кинетику промывки хлопчатобумажной ткани после мерсеризации на основе сравнения коэффициентов массоотдачи и массопроводности;
- разработана математическая модель интенсифицированной промывки, позволяющая оценить ее кинетику в технологических задачах;
- осуществлена оценка ресурсоэффективности и экологической безопасности промывки тканей с ИЭП при сокращении затрат электроэнергии, чистой промывной воды, поверхностно-активных веществ.

Научная новизна работы:

- впервые установлена возможность использования и дана интегральная оценка воздействия ИЭП на эффективность процесса промывки хлопчатобумажной ткани после мерсеризации;
- установлено влияние импульсного электрического поля на кинетические коэффициенты массоотдачи, массопроводности и на свойства промывного раствора в процессе промывки хлопчатобумажных тканей после мерсеризации;

- проведён анализ сорбционных свойств и установлены математические зависимости для определения характеристик хлопчатобумажных тканей как объекта технологической обработки в процессе промывки;

- предложена математическая модель процесса промывки, которая учитывает влияние интенсифицирующего воздействия на его кинетику.

Теоретическую значимость диссертации составляют:

- математическая модель процесса интенсифицированной импульсным воздействием промывки, позволяющая оценить его кинетику в технологических задачах;

- метод количественной оценки интегрального эффекта от воздействия ИЭП на кинетику массоотдачи и массопроводности при экстрагировании щелочи из хлопчатобумажной ткани.

Практическую значимость работы составляют:

- способ интенсификации процесса промывки хлопчатобумажных тканей после мерсеризации, который позволяет сократить его продолжительность, снизить концентрацию поверхностно-активных веществ в технологическом растворе и в сточных водах, что повышает экологическую безопасность;

- результаты экспериментальных исследований кинетики процесса промывки с ИЭП хлопчатобумажных тканей после мерсеризации, позволяющие проводить его инженерный расчёт;

- рекомендации по применению ИЭП в процессе промывки хлопчатобумажных тканей после мерсеризации;

- оценка и описание практически значимыми уравнениями сорбционных свойств объекта промывки.

Практическая значимость подтверждена актами об использовании результатов работы в промышленных условиях и в учебном процессе.

Методология и методы исследования. Исследования основаны на системном подходе к формированию научного обоснования энергоресурсоэффективности и экологичности процесса промывки с ИЭП хлопчатобумажных тканей после мерсеризации. Информационно-теоретической

базой диссертации являются труды отечественных и зарубежных исследователей в области интенсификации процесса промывки хлопчатобумажных тканей, справочная литература.

Использованы теоретические положения массообмена в системе «промывной раствор – ткань», математическая обработка экспериментальных данных, методы физического моделирования, стандартные методы анализа свойств тканей и контроля параметров процесса промывки.

Исследования проводились в лабораториях ОХТ и ПАХТ кафедры ЭТПЭБ, испытательной лаборатории кафедры материаловедения и товарной экспертизы РГУ имени А.Н. Косыгина, лаборатории физики Пятигорского медико-фармацевтического института – филиал ГБОУ ВПО ВолгГМУ.

Достоверность результатов и проведённых исследований подтверждается согласованностью аналитических и экспериментальных результатов, применением современных методов и средств исследований, апробацией основных результатов в научной периодической печати, на конференциях и выставках, а также полученным патентом.

Основные положения, выносимые на защиту:

- результаты экспериментальных исследований кинетики процесса промывки хлопчатобумажных тканей после мерсеризации и особенности воздействия на него импульсного электрического поля (ИЭП);
- результаты оценки на основе экспериментальных данных степени интенсификации процесса промывки с использованием полученных коэффициентов, характеризующих кинетику процесса промывки с ИЭП;
- уравнения для определения сорбционных характеристик хлопчатобумажной ткани как объекта промывки и результаты оценки равновесия в системе «ткань – раствор гидроксида натрия»;
- математическая модель, учитывающая влияние импульсного воздействия на кинетику процесса, которая позволяет оценивать кинетику промывки с ИЭП в технологических задачах;

- технологическое решение, позволяющее уменьшить концентрацию моющих средств в рабочем растворе и в сточных водах при использовании ИЭП, плату за негативное воздействие на окружающую среду на ~47%, время промывки на ~33%, затраты на электроэнергию и чистую воду на ~12 и ~17%, соответственно;
- способ и устройство для промывки хлопчатобумажных тканей различной плотности воздействием импульсных электрических разрядов, защищенные патентом РФ.

Личный вклад автора заключается в формулировке цели и основных задач исследования, в обосновании методов проведения экспериментов и их проведении, анализе и обработке экспериментальных данных по промывке с ИЭП, интерпретации и анализе полученных результатов, формулировке выводов, подготовке материалов для научных публикаций.

Апробация и реализация результатов работы.

Результаты работы докладывались и получили положительную оценку на заседаниях кафедры энергоресурсоэффективных технологий, промышленной экологии и безопасности, Международных и Всероссийских научных конференциях: Международном научно-техническом симпозиуме «Вторые международные Косыгинские чтения, приуроченные к 100-летию РГУ имени А.Н. Косыгина», Москва, 29-30 октября 2019 года; Восьмой Международной научно-практической конференции «Современные энергосберегающие тепловые и массообменные технологии (сушка, тепловые и массообменные процессы) СЭТМТ-2023», Москва, 17-19 октября 2023 г.; Международном научно-техническом симпозиуме, посвященном 120-летию со дня рождения П.Г. Романкова «Повышение энергоресурсоэффективности, экологической и технологической безопасности процессов и аппаратов химической и смежных отраслей промышленности» (ISTS «EESTE-2024»), г. Москва, 20-22 февраля 2024 г. Материалы работы представлены на XV Всероссийской инновационной молодежной научно-инженерной выставке «Политехника», посвященной 190-летию МГТУ им. Н.Э. Баумана, 9 по 13 ноября 2020 г. в МГТУ им. Н.Э. Баумана (диплом первой степени в номинации «Экология техносферы»).

Получен патент № RU 2788462 C2 Российская Федерация, МПК D06C 7/00. Способ и устройство для отделки хлопчатобумажных тканей различной плотности воздействием импульсных электрических разрядов : N 2021106403: заявл. 11.03.2021 : опубл. 19.01.2023.

Публикации. Основные положения научно-квалификационной работы (диссертации) опубликованы в 15 печатных работах, 2 из которых – в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России (спец. 2.6.16); 3 публикации в журнале, индексируемом Web of Science Core Collection и Scopus, 3 публикации в журнале, индексируемом Chemical Abstract.

Структура и объем работы. По своей структуре диссертация состоит из введения, четырёх глав, выводов по каждой главе, заключения, списка литературы. Работа изложена на 150 страницах машинописного текста, содержит 22 рисунка, 24 таблицы. Список литературы включает 165 библиографических и электронных источников.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИЗУЧАЕМОГО ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Хлопчатобумажная ткань как объект технологической обработки в отделочном производстве текстильных предприятий

Основные свойства текстильных волокон

Все текстильные волокна состоят из высокомолекулярных соединений (ВМС). По происхождению они делятся на натуральные волокна и химические волокна. Хлопок относится к текстильным волокнам растительного (целлюлозного) происхождения. Из хлопка изготавливают изделия различного назначения – как бытового, так и технического. Большое значение для процессов массопереноса имеют свойства текстильного материала как объекта технологической обработки [1]. Свойства текстильных волокон – это их особенности, которые проявляются при их создании, переработке и эксплуатации. Их можно разделить на 4 группы [2–4].

Строение, структура и геометрические свойства

Структура и строение волокон и тканей, включая полимеризацию, кристалличность, микрофибриллы и другие параметры, определяют свойства текстильных материалов. Для нитей и тканей это взаимное расположение волокон и элементарных нитей, крутка пряжи и нитей, а также переплетение и плотность в структуре тканей [3].

Геометрические свойства определяют размеры волокон, нитей и тканей. К геометрическим параметрам относят длину, плотность, линейную плотность (толщину), поверхностную плотность, размер поперечного сечения, форму и др.

Линейная плотность и поперечные размеры нитей основы и утка влияют на их взаимное расположение при переплетении, определяют толщину и поверхностную плотность ткани, а также позволяют вычислять показатели заполнения и наполнения ткани волокнистым материалом. Плотность характеризует массу единицы объема ткани, а поверхностная плотность – массу единицы площади ткани.

Переплетение нитей в ткани характеризует порядок взаимного перекрытия продольными нитями основы поперечных нитей утка и влияет не только на внешний вид, но и на свойства тканей. К простым (главным) видам переплетения относят полотняное, саржевое и сатиновое (атласное). Бязь имеет полотняное переплетение – оно имеет одинаковые лицевую и изнаночную стороны, является наиболее простым для выработки. Отличия во внешнем виде достигаются различным сочетанием плотности и толщины основных и уточных нитей.

Плотность ткани по основе (P_o) или по утку (P_y) определяется числом нитей основы или утка на 10 см по ширине или длине ткани. Плотность ткани так же зависит от толщины нитей, что, в свою очередь, влияет на характеристики заполнения, пористости и наполнения.

Такие характеристики как заполнение (линейное, поверхностное и по массе), пористость (относительная, поверхностная, объемная и общая) и наполнение (линейное по основе и по утку) ткани используют для оценки заполненности тканей волокнистым материалом и оказывают влияние на разные свойства ткани, а по их соотношению можно оценить связность нитей в материале [4].

Параметром, используемым для оценки связи, связанной с переходом нитей основы или утка с лицевой стороны на изнаночную и наоборот, является коэффициент связности. Он определяется отношением линейного наполнения к линейному заполнению, и наибольшую связность имеет полотняное переплетение. Заполнение и наполнение ткани оказывают существенное влияние на ее свойства. В случае малого заполнения ткань отличается легкостью, высокой теплопроводностью, гибкостью и проницаемостью, в обратном случае ткань имеет более высокую износостойкость, прочность и поверхностную плотность, а коэффициент теплопроводности и проницаемость у такой ткани ниже [4].

Надо отметить, что текстильные материалы могут изменять размеры при разных воздействиях на них. В случае уменьшения линейных размеров, явление называется усадкой. Это происходит из-за релаксационного процесса и набухания волокон, приводящего к увеличению поперечника нитей [3]. Усадка происходит при смачивании материалов (особенно в случае нагретой воды) и при сушке даже

без механического на них воздействия. После усадки изменяются поверхностная плотность, линейная плотность, а также удлинение при разрыве. Вышесказанное еще раз подчеркивает важность использования воды как можно меньшей температуры при осуществлении промывки. Хлопчатобумажные ткани обладают большей усадкой по сравнению с синтетическими. В таблице 1.1 представлены значения изменения размеров после мокрой обработки различных хлопчатобумажных тканей согласно ГОСТ 29298-2005 [5].

Таблица 1.1 - Изменение размеров после мокрой обработки [5]

Наименование ткани	Изменение размеров после мокрой обработки, %, не более	
	по основе	по утку
Плательные (для платьев, блузок, платьев-костюмов, халатов, рубашек):		
- с малосминаемой отделкой, с отделкой «легкое глажение»	-2,0	±2,0
- с противоусадочной химической отделкой, с малосмываемым аппретом на основе термореактивных смол	-3,5	±2,0
- с малосмываемым аппретом на основе термопластических смол	-5,0	±2,0
Сорочечные:		
- с малосминаемой отделкой, с отделкой «легкое глажение»	-1,5	-1,5; +1,5
- с противоусадочной химической отделкой, с малосмываемым аппретом на основе термореактивных смол	-2,0	-2,0; +1,5
- с малосмываемым аппретом на основе термопластических смол	-3,0	-2,0; +1,5
Бельевые:		
Для белья нательного:		
- с отделкой «легкое глажение», с малосмываемым аппретом на основе термореактивных смол	-3,5	+2,0
- с малосмываемым аппретом на основе термопластических смол	-5,0	+2,0
Для белья постельного	-5,0	+2,0

Физические свойства

Определяют отношение текстильных материалов к воздействию факторов физической природы. Например, тепло-, термо-, огне-, морозостойкость, гигроскопичность, электризуемость, устойчивость к свету, влажность, влагосодержание.

Гигроскопичность (W_g , %) – это способность текстильных материалов поглощать водяные пары и воду из окружающей среды и отдавать их в эту среду [3]. Гигроскопичность тканей зависит от их волокнистого состава, структуры и

отделки. Гигроскопичность хлопкового волокна при нормальных условиях составляет от 8 до 13%. Меньшей гигроскопичностью обладают ткани с меньшей длиной перекрытий в раппорте, например, ткани полотняного переплетения. Отделка тканей также может повлиять на величину гигроскопичности: повысить, если в отделке используются соединения, содержащие гигроскопические вещества, или понизить, в случае использования для отделки синтетических смол [6]. Высокие гигроскопические свойства хлопковых волокон обуславливаются наличием в целлюлозе гидроксильных групп [7].

Паропроницаемость используется для оценки переноса паров влаги в проницаемых материалах и определяет способность материала пропускать сквозь себя пары влаги [8].

Капиллярность материала определяется способностью его продольных капилляров поглощать влагу и оценивается высотой h подъема жидкости в пробе, погруженной одним концом в жидкость на 1 ч. Во время смачивания ткани существенная роль в захвате полотном воды принадлежит именно капиллярным явлениям, что оказывает большое влияние на их сорбционные характеристики. Немаловажным в вопросе смачивания оказывается и направление капилляров [4].

Немаловажными для готовых изделий из текстильных материалов являются и их тепловые свойства. К таковым относят теплопроводность, теплоемкость, теплостойкость, морозостойкость и огнестойкость. Теплопроводность зависит как от состава материала, так и от его структуры, влагосодержания и др. Для хлопка коэффициент теплопроводности (λ) составляет 0,05 Вт/м·°С, однако на теплопроводность готового изделия будут оказывать влияние вид переплетения, пористость, слоистость и способ образования структуры [4]. В [9] показано, что решающее значение для величины коэффициента теплопроводности имеют общая пористость и характер распределения пор, так как это определяет механизм переноса теплоты. В таблице 1.2 представлены некоторые физические показатели хлопчатобумажных тканей согласно ГОСТ 29298-2005.

Таблица 1.2 - Некоторые физические показатели тканей [5]

Наименование ткани	Воздухопроницаемость, $\text{дм}^3/\text{м}^2\cdot\text{с}$; не менее	Гигроскопичность, %, при $\phi = 98\%$, не менее
Плательные: хлопчатобумажные	100	15,0
Сорочечные: хлопчатобумажные	100	15,0
Бельевые: хлопчатобумажные	100	15,0

Механические свойства

Эти свойства характеризуют отношение текстильных материалов к действию различных сил и деформаций. К механическим свойствам относят прочность; износоустойчивость. Характеризуются величиной разрывной нагрузки и разрывного удлинения. Текстильные материалы в большинстве случаев испытывают деформации растяжения [4]. Наиболее характерными показателями механических свойств текстильных материалов являются разрывная нагрузка – максимальное усилие, которое может выдержать материал до разрыва (P_p , Н) и разрывное удлинение – отношение длины растягиваемой пробной полоски к моменту разрыва (ϵ_p , %). Механические свойства изделий могут значительно изменяться в зависимости от числа химических обработок, которым они подвергаются [3]. При увлажнении целлюлозные волокна набухают, увеличивая свои размеры, особенно поперечные; разрывное удлинение их несколько увеличивается, а прочность повышается на 10-20% [7]. В таблице 1.3 представлены значения разрывной нагрузки и стойкости к истиранию некоторых хлопчатобумажных тканей согласно ГОСТ 29298-2005.

Таблица 1.3 - Разрывная нагрузка и стойкость к истиранию готовых тканей [5]

Наименование ткани	Разрывная нагрузка полоски ткани размером 50 x 200 мм, Н (кгс), не менее		Стойкость к истиранию по плоскости, циклы, не менее
	по основе	по утку	
Плательные с поверхностной плотностью от 100 до 200 $\text{г}/\text{м}^2$	216 (22)	147 (15)	-
Бельевые с поверхностной плотностью от 100 до 200 $\text{г}/\text{м}^2$	294 (30)	196 (20)	600
Сорочечные: Из пряжи одиночной Из пряжи крученной	245 (25) 294 (30)	177 (18) 186 (19)	400

Химические свойства

Определяют отношение текстильных материалов к воздействию химических реагентов, используемых в отделочном производстве, например, устойчивость к воздействию кислот, щелочей и др. Хлопчатобумажные ткани являются достаточно устойчивыми к воздействию щелочей. Под действием кислот, в особенности минеральных, целлюлозные волокна разрушаются, вследствие разрушения глюкозидных связей и разрыва макромолекул [7]. Присутствие в составе целлюлозы гидроксильных групп позволяет ей вступать в соединения с различными веществами, что дает возможность проводить химическую модификацию волокон в процессе специальных отделок текстильных материалов [7].

Отделочное производство как один из этапов получения ткани

Отделочное производство включает совокупность химических, тепловых и механических технологических процессов. Для хлопчатобумажных тканей это отбеливание, крашение, печатание, заключительная отделка тканей. Процесс промывки сопровождает практически каждую стадию отделочного производства.

В процессе промывки текстильный материал подвергается различным видам обработки, влияние которой на процесс удаления распределяемого компонента в сплошную среду в значительной степени определяется свойствами текстильного материала: поверхностной плотностью, пористостью, площадью внутренней поверхности пор, распределением пор по размерам, формами связи влаги и технологического загрязнения с материалом, тепловыми и другими физическими характеристиками, способностью текстильного материала к набуханию в воде и его влагопоглощением [1].

В таблице 1.4 приведены некоторые характеристики хлопчатобумажного волокна. Следует отметить, что площадь внутренней поверхности и удельный объем пор определялись экспериментально методом адсорбции паров воды и метанола хлопчатобумажным волокном, что, естественно, даёт разные значения [1].

Таблица 1.4 - Характеристики хлопчатобумажного волокна

Волокно	Площадь внутренней поверхности, м ² /г		Объем пор, см ³ /г		Плотность, г/см ³	Объемное набухание в воде, %	Влагопоглощение при 20°C и φ=65%
	по воде	по метанолу	по воде	по метанолу			
Хлопковое	94-137	20-82	0,130	0,142	1,52	45	7-9

Также на технологический процесс обработки тканей наряду с перечисленными характеристиками могут оказывать влияние некоторые материаловедческие характеристики (таблица 1.5), определяемые артикулом ткани и приведенные в соответствующей справочной литературе и в государственных стандартах на ткани [1].

Таблица 1.5 – Характеристики хлопчатобумажных тканей

Ткань, артикул	Поверхностная плотность, г/м ²	Число нитей на 10 см		Линейная плотность пряжи, текс	
		по основе, По	по утку, Пу	по основе	по утку
Перкаль В, 1470	60	429	504	7,5	5,9
Восточная, 4210	73	202	189	18,5	15,4
Миткаль, 6978	101	251	208	25	15
Сатин, 528	128	274	392	18,5	20
Репс, 790	130	355	180	11,7	40
Бязь, 224	150	272	227	25	36
Бязь, 4714	160	247	236	29	29
Тик, 4003	172	386	390	11,8	18,5
Портьерная, 5219	179	174	136	42	42
Егорьевская, 3080	235	298	200	42	42
Диагональ, 3006	278	287	208	42	72
Полудвунитка, 4800	280	260	158	56	72
Саржа, 3217	287	450	220	29,7	19,2
Двунитка, 6862	340	280	204	56	72
Молескин, 3054	347	260	560	29	42

Формы связи влаги и технологических загрязнений с текстильным материалом. Сорбционно-структурные характеристики

В зависимости от интенсивности энергии связи влаги и загрязнений с материалом различают химическую, физико-химическую и физикомеханическую формы связи. На поверхности любого твердого вещества, в том числе и полимерного материала, существуют разнообразные микро- и макродефекты, на которых происходит адсорбция распределяемого компонента, и такая

адсорбционно связанная влага (или технологическое загрязнение) обладает рядом свойств, которые позволяют отличать ее от свободной воды [1].

Одними из основных характеристик влажных материалов как объектов промывки являются: сорбционно-структурные характеристики (изотермы сорбции-десорбции, кривые распределения пор по радиусам), ответственные за внутреннее диффузионное сопротивление в процессе промывки.

Формы связи влаги с материалом в значительной степени зависят от пористой структуры текстильных материалов [1]. Изотермы сорбции и десорбции позволяют рассчитать эффективный радиус пор, общий объем пор в материале, распределение объема пор по радиусам, а также определить формы связи распределяемого компонента с материалом [1]. Метод обработки экспериментально снятых изотерм сорбции-десорбции считается наиболее рациональным для исследования внутрипористой структуры, поскольку дает возможность оценить не только геометрические размеры реальных пор в материале, но и особенности строения материала с учетом видов связи распределяемого компонента с материалом, влияние изменения пористой структуры материала на механизм массопередачи (т.е. эффективный размер пор) [1]. Полученные таким методом характеристики реального пористого материала (размер и объем пор) характеризуют диффузионное сопротивление протеканию процесса массопередачи, которое оказывает пористая структура материала при промывке [1].

При промывке текстильных материалов обычно преобладают физико-механическая и физико-химическая формы связей загрязнения с материалом [10]. Из-за большого разнообразия технологических загрязнений, удаляемых с текстильных материалов при промывке, невозможно рассмотреть энергию связи каждого загрязнителя. Поэтому для оценки сорбционно-структурных свойств тканей, подвергаемых промывке от различных загрязнений, используются изотермы сорбции паров воды [10].

Волокнистые материалы существенно отличаются своей сорбционной способностью. Сорбционная способность тканей в основном зависит от

сорбционной способности образующих ее волокон [1, 10–12]. В таблице 1.6 приведены экспериментальные данные по максимальной сорбционной влажности для некоторых видов волокон, их влагосодержанию, в том числе при относительной влажности воздуха $\varphi = 0,7$ (в отделочных цехах относительная влажность воздуха, как правило, составляет 65-70 %) [10, 11].

Таблица 1.6 – Сорбционные свойства различных волокон

Волокно	Максимальная сорбционная влажность, %	Количество сорбированной влаги, % ($\varphi = 0,7$)
Натуральные волокна		
Хлопок суровый	25,5	8,0
Хлопок мерсеризованный	29,0	9,5
Шерсть	34,0	16,0
Лен	10,35 (при $\varphi = 0,9$)	7,1
Шелк	23,40	11,9
Химические волокна		
Вискоза	42,5	17,5
Капрон	10,0	4,5
Ацетат	-	-
Полиэфир	0,8	0,5

Из таблицы 1.6 видно, что количество сорбционно-связанной влаги варьируется в зависимости от типа волокон. Согласно классической теории сорбции [11, 13–15], участок изотерм сорбции и десорбции паров воды для пористых материалов в диапазоне от $\varphi = 0,7$ до $\varphi = 1,0$ соответствует содержанию капиллярно-связанной влаги, которая имеет низкую энергию связи с материалом.

В [12, 16] анализируются изотермы сорбции паров воды хлопчатобумажной ткани на разных стадиях отделки, в том числе до и после печати и после промывки для оценки изменений сорбционных свойств под воздействием процессов отделки. Исследовались образцы ткани с поверхностной плотностью 100 г/м²: ткань после печати, после промывки на линии ЛПС-140-10, а также образцы ткани, прошедшей промывку только в первых двух ваннах промывной части линии. Исследованы образцы ткани, подвергшейся только отбеливанию. Результаты показали, что

значения сорбционной влажности образцов схожи при низких значениях относительной влажности (ϕ), но значительно различаются при ϕ от 0,9 до 1. Образцы, прошедшие печать, обладают большей сорбционной емкостью по сравнению с тканью, прошедшей только отбеливание (рисунок 1.1).

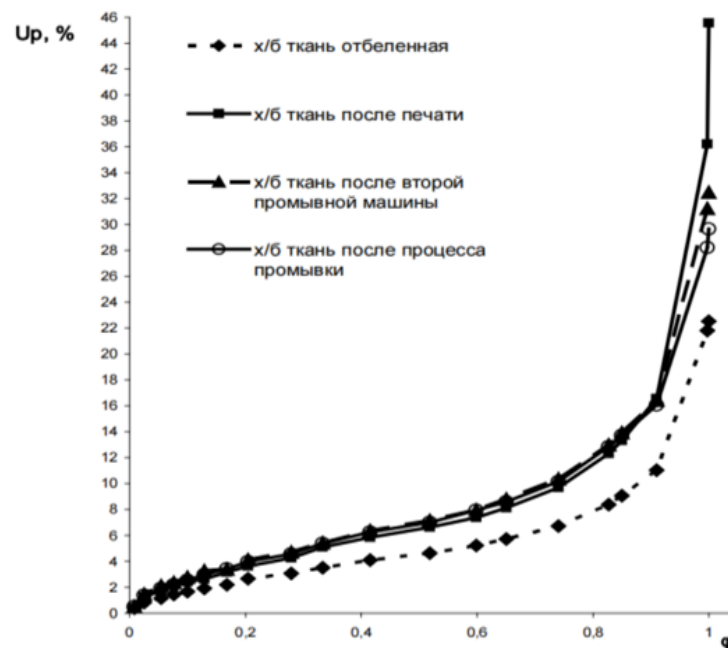


Рисунок 1.1 - Изотермы сорбции паров воды хлопчатобумажной тканью на разных стадиях ее отделки [16]

Согласно [12], образцы хлопчатобумажной ткани, прошедшие печать, имеют значительно большую сорбционную емкость как до, так и после промывки по сравнению с тканью, подвергнутой только отбеливанию. Сорбционная емкость печатных образцов увеличивается уже при низких значениях относительной влажности, что связано с ростом их удельной внутренней поверхности ($S_{уд}$, $\text{м}^2/\text{г}$). Значения удельной поверхности для исследуемых образцов приведены в таблице 1.7.

Таблица 1.7 - Значения удельной поверхности для исследуемых образцов хлопчатобумажной ткани [12]

Образец ткани	Ткань отбеленная	Ткань после печати	Ткань после второй промывной машины	Ткань после промывки
$S_{уд}$, $\text{м}^2/\text{г}$	114	165	190	174

Процесс мерсеризации в химической технологии отделки текстильных материалов

Хлопок - одно из природных целлюлозных волокон, имеющий наибольшее значение. На этапах очистки и подготовки хлопчатобумажные ткани подвергаются приёмке и разбраковке, опаливанию, расшлихтовке, отбеливанию (белению), мерсеризации, ворсованию.

В цехах отделочного производства одним из самых широко используемых и попадающих в достаточно больших количествах в сточные воды реагентов при операциях мерсеризации, беления, отварки является гидроксид натрия (NaOH) различных концентраций, поэтому он часто выбирается в качестве модельного загрязнения при исследовании промывки [17].

Мерсеризация - это технологическая операция, имеющая важное значение в отделочном производстве и направленная на улучшение потребительских свойств хлопкового волокна, таких как гигроскопичность, крашиваемость, шелковистый блеск, эластичность, прочность.

При обработке хлопчатобумажной ткани концентрированными растворами едкого натра происходят химические и физико-химические изменения. В результате этих процессов образуется гидратцеллюлоза, которая, хотя и схожа по химическому составу с целлюлозой, отличается от нее структурным строением молекулы. Мерсеризация вызывает необратимые изменения в структуре целлюлозы, приводя к округлению поперечного сечения волокна. Волокно значительно набухает из-за поглощения воды и щелочи, что изменяет его геометрические размеры [17–20].

Протекающие в ходе этого процесса химические и физико-химические явления обуславливают изменения, происходящие в волокне: повышение реакционной способности по отношению ко всем видам реагентов, повышение сорбционной способности по отношению ко всем видам сорбатов, изменение оптических и физико-механических свойств (блеск, линейные размеры, прочность, эластичность) [18]. Физико-химические процессы при взаимодействии со щелочами обусловлены интенсивным набуханием и даже частичным растворением

низкомолекулярной фракции. Степень набухания определяется температурой и концентрацией щелочи [17].

Мерсеризацию проводят действием на хлопковое волокно концентрированным раствором едкого натра с последующей промывкой. В результате действия на целлюлозу гидроксида натрия происходит превращение целлюлозы в щелочную целлюлозу, а затем в гидратцеллюлозу [21]. В ходе такого превращения практически не изменяется химический состав целлюлозы, но меняется надмолекулярная структура. В мерсеризованном хлопковом волокне происходит разрыв межмолекулярных водородных связей, вследствие чего повышается его реакционная и сорбционная способности [18]. Общая схема превращений, происходящих в хлопковом волокне при мерсеризации показана на рисунке 1.2

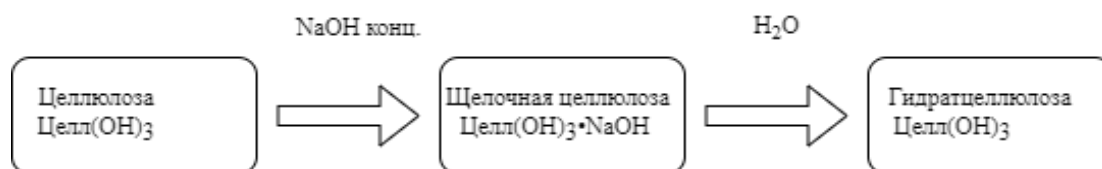


Рисунок 1.2 - Общая схема превращения целлюлозы при мерсеризации [18]

После мерсеризации в ткани остается определенное количество связанной щелочи, не удаляемой при промывке, что демонстрируют кривые сорбции-десорбции [17].

Важное значение имеет также и температура обработки. Реакция образования щелочной целлюлозы является обратимой, а скорости протекания прямой и обратной реакций зависят от температуры процесса. Ввиду того, что мерсеризация является экзотермическим процессом, при повышении температуры равновесие, согласно принципу Ле Шателье, сдвигается в сторону распада щелочной целлюлозы, поэтому мерсеризация протекает лучше при пониженных температурах.

В результате мерсеризации быстро набухают волокна, находящиеся в контакте с щелочью, что затрудняет набухание основной массы волокон, не находящейся с щелочным раствором в непосредственном контакте. Ввиду того, что

концентрированный раствор гидроксида натрия является довольно вязким, его проникновение в структуру плотных тканей является не всегда равномерным.

Так как мерсеризация приводит к усадке материала, ее часто проводят под натяжением. Однако мерсеризация без натяжения волокна и под натяжением приводит к различным результатам. Так, мерсеризованное без натяжения волокно приобретает большую эластичность, а мерсеризованное под натяжением волокно имеет повышенную прочность, у материала снижается удлинение при разрыве, становятся более стабильными линейные размеры.

Среди типов загрязнений, которые присутствуют в хлопчатобумажных тканях, выделяют: природные примеси в волокнах, технологические загрязнения, которые появляются в результате проведения различных технологических операций и случайные загрязнения [18]. Мерсеризация - одна из таких операций, которую проводят с суровой хлопчатобумажной тканью, после которой в ткани остается технологическое загрязнение - гидроксид натрия.

Таким образом, большое значение для процессов массопереноса имеют свойства текстильного материала как объекта технологической обработки, в том числе сорбционно-структурные свойства. Для оценки сорбционно-структурных свойств тканей, подвергаемых промывке от различных загрязнений, используются изотермы сорбции паров воды. Волокнистые материалы существенно отличаются своей сорбционной способностью, которая изменяется в различных процессах отделки. Сорбционная способность тканей в основном зависит от сорбционной способности образующих их волокон. В цехах отделочного производства одним из широко применяемых реагентов при операциях мерсеризации, беления, отварки является гидроксид натрия, поэтому этот реагент выбирается в качестве модельного загрязнения при исследовании процесса промывки.

1.2 Механизм массопереноса при промывке. Задачи диффузии и массопроводности и оценка кинетического режима экстрагирования технологических загрязнений (промывки)

Процесс экстрагирования из твердой фазы в жидкую (выщелачивание) является важным процессом в химической технологии. В частности, процесс промывки текстильных материалов от различных загрязнений является процессом экстрагирования из твердой фазы. Процесс является нестационарным и сопровождается изменением концентрации распределяемого компонента как в одной фазе, так и в другой. Наряду с общими закономерностями, характерными для массообменных процессов, в процессах переноса вещества в твердом теле существенную роль играют структура этого тела, его физико-химические свойства, их изменение в процессе экстрагирования, а также другие факторы [22, 23].

Экстрагированием называют процесс извлечения компонентов из твердых веществ в жидкую фазу (экстрагент), основанный на избирательном их растворении в экстрагентах. Экстрагирование из твердой фазы в жидкую еще называют выщелачиванием. Извлекаемый компонент при этом растворим в жидкой фазе. Перенос вещества из одной фазы в другую сопровождается изменением его концентрации как в одной фазе, так и в другой. При этом изменение концентрации происходит как в пространстве, так и во времени. Пределом достигаемой концентрации растворенного вещества является концентрация насыщенного раствора, которая соответствует равновесию между веществом в растворе и в твердой фазе. Кинетика процесса экстрагирования зависит от диффузионных процессов: молекулярной, конвективной диффузий [22, 23].

Молекулярная диффузия представляет собой беспорядочное движение молекул в неподвижной среде и описывается законами диффузии Фика. Первый закон Фика гласит, что в одномерной системе с градиентом концентрации вещества dC / dx в направлении x диффузионный поток J определяется следующим выражением [24]:

$$J = -D \frac{dC}{dx}, \quad (1.1)$$

где D - коэффициент молекулярной диффузии, определяемый как масса диффундирующего вещества в единицу времени через единицу поверхности при градиенте концентраций равном единице. Знак минус указывает на то, что молекулярная диффузия протекает в направлении уменьшения концентрации распределяемого компонента.

В одномерной системе с градиентом концентраций вещества dC / dx в направлении x , скорость изменения концентрации вещества в данной точке, обусловлена диффузией, и определяется вторым законом Фика [24]:

$$\frac{dC}{d\tau} = D \frac{d^2C}{dx^2}, \quad (1.2)$$

где τ — время.

Конвективная диффузия представляет собой перенос, частиц растворенного вещества вместе с потоком движущейся жидкости. Распределение концентраций при переносе путем конвективной диффузии определяется в общем виде дифференциальным уравнением конвективной диффузии [25].

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} + \omega grad c = D \nabla^2 c \quad (1.3)$$

При обтекании твердого тела жидкостью или газом вблизи твердой поверхности образуется диффузионный пограничный слой, характеризующийся постепенным затуханием турбулентных пульсаций по мере приближения рассматриваемой точки к границе раздела фаз [22]. При этом на внешней границе слоя перенос вещества в направлении, перпендикулярном к направлению движения среды, осуществляется преимущественно турбулентной диффузией, описываемой следующим уравнением:

$$\frac{\partial C'_c}{\partial \tau} = [(D + \varepsilon_d) grad C'_c] - \vec{v} grad C'_c \quad (1.4)$$

на внутренней - молекулярной диффузией, а в промежуточной области механизм массопереноса смешанный - молекулярно-диффузионный [22].

При обтекании твердого тела жидкостью или газом вблизи твердой поверхности образуется диффузионный пограничный слой, характеризующийся постепенным затуханием турбулентных пульсаций по мере приближения

рассматриваемой точки к границе раздела фаз [22]. В диффузионном пограничном слое перенос распределяемого вещества в общем случае происходит в результате молекулярной и конвективной диффузии [23]:

$$i = -(D + \varepsilon_d) \frac{\partial C}{\partial x}, \quad (1.5)$$

где x - координата, ориентированная перпендикулярно к поверхности тела; ε_d - коэффициент турбулентной диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$.

Для текстильных материалов скорость диффузии обусловлена толщиной материала, его структурой, взаимосвязью между распределяемым компонентом и материалом, теплофизические характеристики. При увеличении толщины материала увеличивается длина пути диффузии распределяемого материала. Также скорость диффузии зависит и от размеров пор: в крупных порах скорость диффузии выше, чем в мелких [26].

Термин «диффузия», учитывая сложный механизм переноса распределяемого компонента в процессах экстрагирования (промывки) текстильных материалов заменяют на «массопроводность» материала, который имеет более общий смысл [26]. Оба коэффициента (коэффициент диффузии D и коэффициент массопроводности K_m) имеют одну и ту же размерность - $\text{м}^2/\text{с}$.

Так как процесс экстрагирования из текстильных материалов (процесс промывки) можно рассматривать как изотермический (или изотермический на определенной стадии), то для описания такого процесса достаточно уравнения массопроводности без учета градиента температуры [26]:

$$\frac{\partial C'}{\partial \tau} = [K_m(C') \text{grad} C'], \quad (1.6)$$

где: C' - концентрация распределяемого компонента; τ - время.

В том случае, когда значения коэффициентов массопроводности можно рассматривать как постоянные за некоторый промежуток времени, можно получить формулу (1.7), вынося их за знак дифференциального оператора div [26]:

$$\frac{\partial C'}{\partial \tau} = K_m \Delta C', \quad (1.7)$$

где Δ - оператор Лапласа.

Текстильные материалы, в частности, ткани, можно рассматривать как капиллярно-пористые тела. Перенос вещества из твердого капиллярно-пористого тела в жидкую среду может происходить при наличии градиента концентраций в направлении достижения равновесия, что является движущей силой массообменных процессов. Сложная структура капиллярно-пористого тела (размер пор, форма капилляров, полидисперсность и пр.) оказывает значительное влияние на массоперенос. В начале процесса распределяемое вещество перемещается в жидкую фазу с поверхности раздела фаз и скорость процесса имеет линейную зависимость, скорость постоянна. При дальнейшем течении процесса концентрация распределяемого вещества в твердом теле снижается, что приводит к уменьшению движущей силы и при достижении т.н. критической концентрации скорость процесса снижается.

В период падающей скорости общая скорость массопереноса будет определяться скоростью перемещения общего массового потока вещества от поверхности испарения к поверхности тела, т. е. скоростью массопроводности, которая определяется механизмом массопереноса [27]. Общая схема модели массопереноса в капиллярно-пористом теле показана на рисунке 1.3.

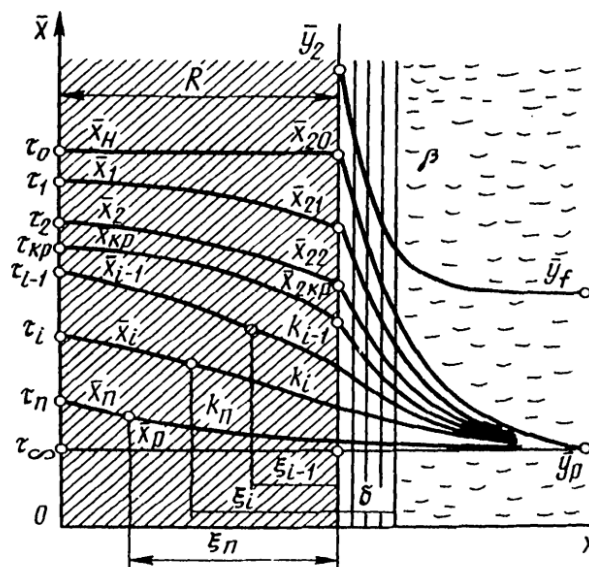


Рисунок 1.3 - Модель массопереноса в капиллярно-пористом теле

Процесс массопроводности описывается уравнением, аналогичным закону Фика [27]:

$$i = -\frac{dM}{F d\tau} = -k \frac{\partial X}{\partial l} \quad (1.8)$$

где: k - коэффициент массопроводности, X - концентрация распределяемого вещества в твердом теле.

Перенос вещества из фазы к границе раздела фаз или в обратном направлении, т.е. в пределах одной из фаз, называется массоотдачей. Процесс массоотдачи описывается законом массоотдачи Щукарева. Если коэффициент массопроводности определяют, как правило, при $Bi \rightarrow \infty$, то для изучения коэффициентов массоотдачи осуществляют режим $Bi \rightarrow 0$ [22]. Коэффициент массоотдачи β означающий количество вещества, которое передается через единицу поверхности раздела фаз в единицу времени при разности концентраций в ядре потока и около поверхности, равной единице, описывается уравнением (1.9) [24]:

$$dM = \beta(C_{\pi} - C')dF d\tau \quad (1.9)$$

где β - коэффициент массоотдачи, м/с; M - количество перенесенного вещества, кг; C_{π} - концентрация на поверхности раздела фаз, кг/м³; C' - концентрация в жидкости, кг/м³; F - площадь, м²; τ - время, с.

При экстрагировании из твердой фазы коэффициент массоотдачи β уменьшается по мере протекания процесса вследствие увеличения пути диффузии через поры нерастворимого материала.

Для расчета коэффициента массоотдачи применяются также и критериальные уравнения на основе таких критериев как: критерий Фурье массообменный, критерий Рейнольдса, критерий Прандтля массообменный, число Нуссельта массообменное [22].

Массопередачей называют процесс перехода вещества (или нескольких веществ) из одной фазы в другую в направлении достижения равновесия, а коэффициент массопередачи показывает, какое количество вещества переходит из одной фазы в другую фазу в единицу времени через единицу поверхности фазового

контакта при движущей силе, равной единице. Движущей силой массообменных процессов на практике выражают через разность рабочей и равновесной концентраций по фазам, поскольку расчет истинной движущей силы (разность химических потенциалов) для реальных систем сопряжен со значительными трудностями. Поэтому уравнение массопередачи, применительно в том числе и к случаю экстрагирования, записанное по твердой фазе по отношению к единичному телу имеет вид [22]:

$$\frac{dM}{F d\tau} = K(\bar{C} - C_p) \quad \bar{C} > C_p \quad (1.10)$$

по внешней фазе [9]:

$$\frac{dM}{F d\tau} = K_c(C'_{c.p} - C'_p) \quad C'_{c.p} > C'_p \quad (1.11)$$

где F - поверхность частицы, м^2 ; $\frac{dM}{F d\tau}$ - средняя по поверхности F скорость массопередачи, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; $\bar{C} - C_p$ - движущая сила по твердой фазе, $\text{кг}/\text{кг}$ твердой фазы; $C'_{c.p} - C'_p$ - движущая сила по внешней фазе, $\text{кг}/\text{м}^3$; K, K_c - коэффициенты массопередачи по твердой и внешней фазам, $\text{кг}/[\text{м}^2 \cdot \text{с} (\text{кг}/\text{кг})]$ или $\text{кг}/[\text{м}^2 \cdot \text{с} (\text{кг}/\text{м}^3)]$.

Задачи массообмена

В отношении массообменных процессов различают внутреннюю, внешнюю и смешанную задачи. В зависимости от структуры капиллярно-пористого тела, режима проведения процесса и концентрации вещества в твердой фазе стадией, определяющей скорость процесса, может быть внешний либо внутренний массоперенос, либо скорость общего процесса будет определяться обеими стадиями процесса одновременно. Для характеристики влияния внутреннего и внешнего массопереноса на кинетику процесса служит значение критерия Био массообменного, которое представляет отношение внешнедиффузионного сопротивления массопереносу к внутридиффузионному. Критерий Био массообменный показывает соотношение между скоростью перемещения вещества от поверхности фаз в омывающую фазу, которая характеризуется коэффициентом массоотдачи β и скоростью массопроводности [27].

Задачу массообмена считают внутренней, когда $Bi_m \rightarrow \infty$. В этом случае условия массообмена определяются в основном свойствами, например, текстильного материала. На практике принимают, что $Bi_m \rightarrow \infty$ при $Bi_m > 50$ (либо 30). Внешняя задача определяется при $Bi_m \rightarrow 0$. В этом случае условия массообмена определяются в основном скоростью движения сплошной фазы относительно твердого тела. Смешанной задача считается при $0,2 < Bi_m < 50$ [26].

Дифференциальное уравнение диффузии описывает изменение локальной концентрации в пространстве и времени. Для получения этой функции необходимо задаться соответствующими условиями однозначности, которые включают в себя геометрическую форму и размеры частицы, в которой происходит диффузия, начальное условие, граничное условие (включает в себя граничные условия первого, второго, третьего и четвертого рода) и величину коэффициента диффузии, а также других параметров, существенных для процесса [23].

При формулировке математической задачи о диффузии вещества из пористой частицы необходимо указывать начальное условие, граничное условия, а также форму и размеры пористого тела [24].

Начальное распределение в большинстве случаев принимают равномерным [22]:

$$C(x, 0) = C_n = const \quad (1.12)$$

Наличие в уравнениях пространственных изменений приводит к необходимости установления граничных условий (ГУ), т.е. ситуации на границе рабочей зоны технологического аппарата [28].

Говоря об экстрагировании из твердого тела начальное условие описывает распределение концентрации внутри тела в начальный момент времени, граничное условие описывает закон взаимодействия между поверхностью пористого тела и жидким экстрагентом [24].

ГУ-1 задает закон изменения концентрации в твердой фазе у поверхности тела, ГУ-2 задает закон изменения плотности потока массы около поверхности тела, ГУ-3 говорит о том, что плотность потока массы во внешней фазе около

поверхности тела выражается законом Щукарева, ГУ-4 выражает равенство потоков массы на границе сопряжения двух тел с различной теплопроводностью.

Граничное условие первого рода состоит в задании концентрации или потенциала на поверхности [24]:

$$C_n = C_1 \quad (1.13)$$

$$\mu_n = \mu_1 \quad (1.14)$$

где C_1 , μ_1 - концентрация и химический потенциал растворенного вещества во внешней среде.

При высокоинтенсивном внешнем массообмене реализуются граничные условия первого рода. При определенной скорости движения жидкости относительно частицы (твердого тела) происходит внутридиффузионный режим и скорость процесса лимитируется диффузией сквозь пористый материал [24].

Если концентрация во внешней фазе равна нулю и внешедиффузионное сопротивление пренебрежимо мало, то граничное условие нулевое: $C_n = C_1 = \text{const}$ [22].

Из четырех видов граничных условий для экстрагирования особое значение имеют граничные условия первого и третьего родов, характеризующие закон конвективного массообмена между поверхностью тела и окружающей средой [24].

Способ задания граничных условий третьего рода заключается в использовании эмпирического закона отвода массы вещества с поверхности твердой частицы [24]:

$$j = \beta_c(C_n - C_1), \quad (1.15)$$

где β_c - коэффициент массотдачи.

С учетом того, что такое количество вещества должно доставляться к поверхности частицы с помощью диффузии, граничные условия третьего рода можно представить следующим образом [24]:

$$-D_m \left(\frac{\partial C}{\partial n} \right)_n = \beta_c(C_n - C_1) \quad (1.16)$$

Процесс экстрагирования из твердой фазы может протекать во внутренней диффузионной области (в этом случае основное сопротивление процесса

сосредоточено в твердой фазе), внешней - в таком случае процесс лимитирует массоотдача, и в смешанной области. В последнем случае на скорость массопереноса оказывают влияние как внутреннее, так и внешнее диффузионное сопротивление. Как отмечено выше, о том, какой является конкретная задача (внутренней, внешней или смешанной) судят по величине массообменного критерия Bi_m - числу Био массообменному.

$$Bi_m = \frac{\beta_c R}{D_m} \quad (1.17)$$

Для упрощения расчетов и задания условий однозначности, процессы экстрагирования рассматривают для тел простых геометрических форм в условиях, когда концентрация вне пористого тела постоянна. К таким формам относят неограниченную пластину, неограниченный цилиндр, шар и др. Для пластины R = половина толщины пластины. Ткань, как правило рассматривается как неограниченная пластина [24].

Обобщенное теоретическое решение для неограниченной пластины, неограниченного цилиндра и шара имеет вид [24]:

$$\frac{\bar{C} - C_1}{C_0 - C_1} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4(\nu + 1)Bi^2}{\mu_n^2(Bi^2 - 2\nu Bi + \mu_n^2)} e^{-\mu_n^2 \frac{Dt}{R^2}} \quad (1.18)$$

Для пластины $\nu = -1/2$, для цилиндра $\nu = 0$, для шара $\nu = 1/2$.

μ_n - корни характеристического уравнения (1.18):

$$\frac{J_{\nu+1}(\mu)}{J_{\nu}(\mu)} = \frac{Bi}{\mu} \quad (1.19)$$

где $J_{\nu+1}$ и J_{ν} - функции Бесселя.

Теоретической основой кинетики массообменных процессов является теория массопередачи. Однако для решения уравнения, выведенных из этой теории необходимо определить кинетические параметры, и определить их возможно лишь экспериментально по кинетическим кривым процесса [25, 26].

Все методы определения коэффициента массопроводности, применяемые для расчетов экстрагирования можно разбить на группы [22]:

- стационарные и нестационарные, в которых коэффициент массопроводности вычисляется по основному уравнению массопроводности;
- стационарные и нестационарные, в которых коэффициент массопроводности определяется из решений дифференциального уравнения массопроводности.

Для расчета коэффициентов массопроводности в пористой структуре твердого тела часто применяется зональный метод, основанный на использовании кинетических кривых. Согласно этому методу, коэффициенты массопроводности распределяемого компонента k' для небольшого участка кинетической кривой, соответствующего второму периоду протекания процесса, можно рассчитать по уравнению, полученному в результате решения уравнения нестационарной массопроводности (второй закон Фика) [26]:

$$k' = \frac{R^2}{\mu^2 \Delta \tau_i} \ln \left[\frac{C'_{iH} - C'_{pK}}{C'_{iK} - C'_{pK}} \right], \quad (1.20)$$

где R - радиус цилиндрической пористой частицы (волокна); μ - корень характеристического уравнения, являющегося решением уравнения массопроводности; C'_{iH} , C'_{iK} - начальная и конечная концентрация распределяемого компонента на i -том участке кинетической кривой (часть кинетической кривой, соответствующая второму периоду делится на несколько участков); $\Delta \tau_i$ - продолжительность процесса экстрагирования на i -том участке кинетической кривой (определяется по графику).

Зональный метод относится к группе методов нестационарного режима. С помощью этого метода можно рассчитать, например, необходимое время пребывания материала в непрерывнодействующем массообменном аппарате, или зная зависимость концентрации от времени, найти зависимость коэффициента массопроводности из кривой кинетики процесса. Предпосылки для данного метода следующие: в пределах некоторого интервала изменения концентрации в твердой фазе (концентрационной зоне) все физические параметры процесса постоянны; концентрационные зоны по величине выбирают такими, что для них справедливы формулы регулярного режима; изменение параметров процесса, зависящих от

концентрации, учитывается по этой концентрации [22]. Данный метод обеспечивает достаточную точность для инженерных расчетов [23].

В [29] был разработан модифицированный метод определения коэффициента массоотдачи β_c и зависимости $k = f(u)$ из кинетической кривой процесса, представляющей оба его периода и не требующей в последнем случае исключения внешнего диффузионного сопротивления. Этот метод был использован для расчета кинетических коэффициентов в [30]. Для этого определяли коэффициент массоотдачи по кинетическим кривым, затем вычисляли модифицированный коэффициент массоотдачи, после этого находили истинный коэффициент массоотдачи, зависимость $k = f(u)$ определялась зональным методом на основе решения дифференциального уравнения массопроводности для бесконечной пластины, для чего весь диапазон изменения массосодержания распределяемого вещества от u_n до $\bar{u}_k$ (где $\bar{u}_k$ — конечное массосодержание на опытной кривой кинетики) разбивали на 4 интервала (концентрационные зоны), для каждого из которых находили значение коэффициента k_i .

В [31] была сформулирована задача нестационарной диффузии целевого компонента от поверхности цилиндра. В качестве твердой фазы рассматривалось тело цилиндрической формы - волокно или нить. Для получения выражения, описывающего нестационарную массоотдачу от цилиндрического тела во внешнюю фазу (среду), рассматривали кратковременный процесс нестационарной диффузии у поверхности этого тела, из которого происходит экстрагирование целевого компонента в среду с концентрацией C_c . Также считали, что вследствие чрезвычайно малого времени контакта диффузионный пограничный слой еще не сформировался и в непосредственной близости от поверхности цилиндрического тела имеет место молекулярная диффузия. Найденное решение может быть использовано для расчета коэффициентов массоотдачи в нестационарных процессах массообмена, протекающих быстро или в условиях интенсивных пульсаций внешней среды, вызванных, например, акустическими или электроразрядными воздействиями, накладываемыми на систему с целью интенсификации процесса.

При интенсивном режиме массообмена в экстракционных аппаратах для систем с твердой фазой могут происходить изменения в механизмах переноса вещества в пористых частицах. В частности, при высоком гидродинамическом режиме в крупных порах происходит конвективный механизм массопереноса, в то время как в тонких порах перенос вещества осуществляется за счет молекулярной диффузии [32]. Данные механизмы описываются как "математическая модель с бидисперсной структурой" [33] и "диффузионно-конвективная модель" [34]. В работе Р.Ш. Абиева и Г.М. Островского [33] представлена двумерная плоская модель частицы твердого вещества, где выделены две области: пористый блок с тонкими плоскими порами, где происходит молекулярная диффузия вещества вдоль координаты "у", и плоские транспортные каналы, по которым вещество перемещается от тонких пор к поверхности частицы путем конвективной диффузии вдоль координаты "х". В [33] было проведено численное моделирование процесса экстрагирования с учетом равномерного начального распределения концентрации в областях пористого блока и транспортных каналов, а также постоянной концентрации на торцах транспортного канала длиной L. Эта модель позволила лучше понять процессы массопереноса в экстракционных системах с твердой фазой.

Таким образом, процесс экстрагирования из твердого тела, как массообменный процесс, можно описать на основе закона массопередачи. В ходе процесса массопередачи, в том числе при экстрагировании, распределяемое вещество перемещается как внутри структуры твердого тела (массопроводность), так и с поверхности твердого тела в жидкую среду (массоотдача). Тип задачи массообмена определяется с использованием критерия Био массообменного.

1.3 Определение коэффициентов массопереноса в хлопчатобумажных тканях на основе кинетических кривых сорбционного увлажнения

В отделочном производстве текстильной промышленности процессы термовлажностной обработки во многом определяют эффективность производства и качество готовых материалов, поэтому совершенствование технологий

производства текстильных материалов требует глубокого изучения широкого круга проблем тепломассопереноса в капиллярно-пористых средах [35].

В [35] проведён анализ методов расчёта кинетических коэффициентов массопереноса в капиллярно-пористых материалах [29, 36–42].

Расчетная формула для коэффициента влагопроводности (для переноса в виде жидкости) имеет вид [39, 40]:

$$a_m = \frac{K_{23}\Psi_2(\theta_2)}{\mu_2} \cdot \frac{RT}{\bar{v}} \cdot \frac{u}{\varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial u}; \varphi = \varphi(u, T), \quad (1.21)$$

где $a_m = a_m(u, T)$ - коэффициент влагопроводности, м²/с; u – влагосодержание; φ - относительная влажность воздуха; T – температура, К; $\Psi(\theta)$ – относительная фазовая проницаемость; θ_i - насыщенность объема порового пространства i -ой фазой; μ – вязкость, Па·с; R – универсальная газовая постоянная Дж/(моль·К); $\bar{v}$ – молярный объем жидкости, м³/моль; K_{23} - коэффициент проницаемости жидкой фазы при полном насыщении, м². Нижние индексы относятся отдельным фазам гетерогенной системы: индекс 1 – к парогазовой, 2 – к жидкой, 3 – к твердой фазе.

Коэффициент влагопроводности нелинейным образом зависит от влагосодержания и температуры в данной частице материала. Функция относительной фазовой проницаемости для процессов переноса связанной воды принимается равной единице.

Для расчетов $a_m = a_m(u, T)$ необходимы: уравнение изотермы сорбции паров воды $\varphi = \varphi(u, T)$ и значение коэффициента проницаемости пористой системы жидкостью K_{23} .

Для получения уравнения изотермы сорбции $u = u(\varphi, T)$ на вакуумной сорбционной установке с весами Мак-Бена-Бакра получены кинетические кривые сорбционного увлажнения окрашенной хлопчатобумажной ткани с поверхностной плотностью $M = 138 \pm 7$ г/м² при различных значениях относительной влажности воздуха, предельные значения которых определяют изотерму сорбции.

Для описания сорбционных свойств исследуемой ткани использовано уравнение Л.Б. Цимерманиса [43], которое для типичных капиллярно-пористых тел имеет вид:

$$u = u_{\text{мг}} \varphi^{a_0 k \varphi} \quad (1.22)$$

где u – равновесное влагосодержание, $u_{\text{мг}}$ – максимальное гигроскопическое влагосодержание при данной температуре, φ – относительная влажность воздуха, a_0 и k – безразмерные постоянные, называемые, соответственно, структурной активностью капиллярно-пористого материала и коэффициентом приращения активности связи.

На основе опытной изотермы сорбции с использованием метода наименьших квадратов определены постоянные члены уравнения изотермы сорбции (1.22): $a_0 = 0,8474$; $k = 7,824$; $u_{\text{мг}} = 0,286$.

Задача определения коэффициента проницаемости формулировалась на основе прямой краевой задачи для нестационарного нелинейного уравнения влагопроводности в осесимметричном образце при отсутствии фазовых переходов [39]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (a_m r \frac{\partial u}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} (a_m \frac{\partial u}{\partial z}); \quad (1.23)$$

$$u(0, r, z) = u_0 < u_r(\varphi_c, T_c); \quad (1.24)$$

$$u|r_i = u_p(\varphi_c, T_c); \frac{\partial u}{\partial r}|_{r_2} = 0. \quad (1.25)$$

Здесь t – время; r, z – радиальная и осевая координаты образца; u_p – равновесное влагосодержание материала; индекс c – относится к среде, окружающей образец, 0 – начальное состояние. Часть внешней границы образца (Г1) контактирует с окружающей средой, другая часть (Г2) – влагоизолирована.

Используя семейства опытных значений среднего влагосодержания $u_{\text{ср}}(t) = \frac{1}{V} \int_V u(t, r, z) dV$, полученные на основе измерений при различных значениях

$$\varphi_c u_{\text{ср}j,i} = u_{\text{эксп}}(t_j, \varphi_{ci}), \quad (1.26)$$

можно получить значения коэффициента проницаемости, входящего в формулу (1.21). Для этого требуется решение коэффициентной обратной задачи.

Квазирешением для обратной коэффициентной задачи (1.23-1.25) является величина K_{23} , минимизирующая функционал вида:

$$J(K_{23}) = \sum_i \sum_j \{[u_{cpi,j}(K_{23}) - u_{\text{эксп}}(t_j, \varphi_{ci})]/u_{\text{эксп}}(t_j, \varphi_{ci})\}^2 \rightarrow \min. \quad (1.27)$$

Величина коэффициента проницаемости найдена с использованием численных методов в условиях одномерного приближения. Найденное решение дает значение коэффициента проницаемости $K_{23} = 10^{-16} \text{ м}^2$.

Таким образом, установлено удовлетворительное совпадение кинетических зависимостей, полученных опытным и расчётным путем.

Показано, что использование локальных коэффициентов влагопроводности позволяет описать сорбционное увлажнение окрашенного хлопчатобумажного материала при различных параметрах сушильного агента.

Для сравнения использовалась эмпирическая зависимость $a_m = a_m(u)$, приведенная в работе [37]. Показано, что предложенный способ определения коэффициента влагопроводности учитывает качественные особенности механизма влагопереноса в ткани и может использоваться в инженерных методах расчета процессов тепло-массообменных процессов.

1.4 Интенсификация процесса промывки хлопчатобумажных тканей

В условиях конкуренции на рынке особо важное значение приобретает как техническое совершенствование текстильной промышленности, основанное на внедрении высокопроизводительных энергосберегающих технологий, так и возможность выпуска тканей с улучшенными потребительскими свойствами и внешним видом на имеющемся оборудовании.

В технологии текстильной промышленности имеет место большое количество энерго- и ресурсоемких технологических операций, которые нуждаются в интенсификации. В частности, процесс промывки, который сопровождает практически все стадии отделки текстильных материалов.

В технологии текстильной промышленности имеет место большое количество энерго- и ресурсоемких технологических операций, которые нуждаются в интенсификации. В частности, широко применяемый в отделке процесс промывки текстильных материалов.

В текстильной промышленности расходуется большое количество воды, химических реагентов, что сопровождается выбросами вредных веществ в атмосферу и сбросами в сточные воды. Технологии, направленные на снижение ресурсоёмкости и затрат энергии, уменьшение количества вредных выбросов в атмосферу и сбросов в сточные воды, будут иметь решающее значение для текстильной промышленности, поскольку она должна обеспечивать важнейшие потребности населения.

Экономия воды и уменьшение загрязненности сточных вод должно быть частью стратегии отрасли, направленной на повышение экологичности производственных процессов.

Текстильная промышленность включает большое количество предприятий, которые вместе потребляют значительное количество энергии.

Текстильная промышленность (особенно в процессах влажной обработки) является одним из крупнейших потребителей воды и, следовательно, одним из основных источников промышленных сточных вод. Кроме того, поскольку различные химические вещества используются в таких процессах, как предварительная обработка, крашение и другие отделочные операции, сопровождающиеся промывкой, текстильные сточные воды содержат много токсичных химикатов, которые при неправильной обработке перед сбросом в окружающую среду могут нанести серьезный экологический ущерб.

Решение задачи снижения ресурсоёмкости, энергоёмкости в текстильной отрасли при обеспечении рационального и экологически безопасного использования энергии, воды и химических реагентов невозможно без совершенствования процессов термовлажностной обработки, в том числе процесса промывки, в значительной степени определяющего качественные показатели готовых текстильных материалов.

В химической технологии отделки тканей их промывка от различных технологических загрязнений является во многом определяющей качество готового материала ресурсоёмкой операцией, которая сопровождает практически каждую технологическую стадию в химической технологии отделки тканей [26, 44].

Технологические загрязнения (незафиксированные красители, печатная краска, поверхностно-активные вещества, щёлочь, жировые вещества и др.) содержатся в ткани не только на ее поверхности, но и внутри нее, поэтому промывка ткани является с физико-химической точки зрения процессом экстрагирования целевого компонента (распределяемого вещества) из ткани [26, 44].

Повышение эффективности процесса промывки за счёт его интенсификации является актуальной задачей, поскольку её решение позволяет снизить расход чистой промывной воды и химических реагентов, в частности, поверхностно-активных веществ, количество сточных вод, энергозатраты на проведение процесса [26, 44, 45].

В [46–51] разработаны математические модели процессов экстрагирования технологических загрязнений из различных материалов, в том числе тканей и волокон.

Технологические факторы, влияющие на процесс промывки

В соответствии с современными представлениями все влияющие на характер процесса промывки конкретные технологические факторы: род загрязнения, вид волокнистого материала, температура и длительность процесса, и многие другие разбивают на следующие группы:

- физико-химические свойства загрязнений;
- факторы, характеризующие саму ткань как объект промывки;
- физико-химические свойства промывного раствора, его температура и продолжительность воздействия;
- факторы, оценивающие условия протекания процесса, в том числе гидродинамическую обстановку [17].

Факторы первых трех групп определяют в основном скорость диффузионного переноса загрязнений в толще ткани, а факторы последней группы в основном характеризуют интенсивность массоотдачи с поверхности ткани (диффузию загрязнения через пограничный слой промывного раствора [17]).

По своей природе методы интенсификации можно разделить на гидромеханические (прополаскивание, динамический напор, барботаж и др.) и физико-химические (методы, изменяющие поверхностные свойства и проницаемость волокна) [1].

Таким образом, интенсифицирующий эффект может быть достигнут разными путями, поскольку процесс промывки связан с большим многообразием аппаратов, обеспечивающих данный процесс, различными технологическими загрязнениями, от которых необходимо избавиться в процессе промывки, а также различными свойствами самой ткани и волокон, которые подвергаются воздействию промывного раствора. В связи с таким многообразием задач, необходимо учитывать условия и особенности протекания процесса промывки в различных случаях и обоснованно подходить к выбору способа интенсифицирующего воздействия.

В процессе промывки можно выделить несколько стадий. Вначале ткань смачивается в промывной жидкости. Загрязнения, находящиеся на поверхности и в крупных порах материала десорбируют в жидкость, а на место загрязненной жидкости проникает более чистая промывная вода. Далее происходит диффузионный перенос загрязнений из толщи ткани к ее поверхности, а затем и эти загрязнения переходят в промывную жидкость и уносятся ею. Таким образом, процесс промывки является сложным массообменным процессом, проходящим в гетерогенной системе между самой тканью, загрязнением и промывной жидкостью (рисунок 1.4).



Рисунок 1.4 - Схема стадий процесса промывки [17]

На характер протекания процесса промывки могут влиять множество факторов, которые связаны со свойствами самого загрязнения, свойствами ткани, как объекта промывки, характеристиками промывного раствора, а также с условиями протекания процесса.

Способы интенсификации процесса промывки и выбор способа

Согласно [17] актуальные способы интенсификации промывки тканей находятся в области:

- совершенствования существующего и создания нового промывного оборудования;
- использования новых или изменения существующих промывных сред.

Главным основанием для выбора рационального способа интенсификации является род загрязнения и его свойства (природа, растворимость или нерастворимость и т.д.), а также свойства обрабатываемого текстильного материала (свойства самого волокна, структура ткани, чувствительность к некоторым операциям, например, таким, как натяжение).

В [17] приведены результаты сравнения различных методов интенсификации процесса промывки с учетом современных исследований и экспертных оценок. Это сравнение было проведено на основе эффективности методов (технической и экономической), эксплуатационной технологичности и экологической безопасности. Также в [17] приведена классификация известных способов интенсификации процесса промывки, основой которой послужило отношение интенсифицирующего воздействия к ткани и раствору. Согласно этой классификации, выделяют 7 групп способов интенсифицирующих воздействий:

- 1 группа связана со способом подготовки материала ткани (напр., прогревание);
- 2 группа связана с заправкой и транспортировкой ткани (напр., «петля в петле»);
- 3 группа связана с механическим воздействием на ткань (напр., отжим);
- 4 группа связана с гидродинамическим воздействием на ткань (напр., неподвижные отсекатели);
- 5 группа связана с гидравлическим воздействием на ткань (напр., гидроакустические устройства);
- 6 группа связана с физическим изменением свойств раствора (напр., высоковольтные разряды);
- 7 группа связана с химическим изменением свойств раствора (напр., использование ПАВ).

Таким образом, все способы интенсификации процесса промывки можно условно разделить на две большие группы: способы, связанные с воздействием на ткань и способы, связанные с воздействием на раствор (рисунок 1.5).

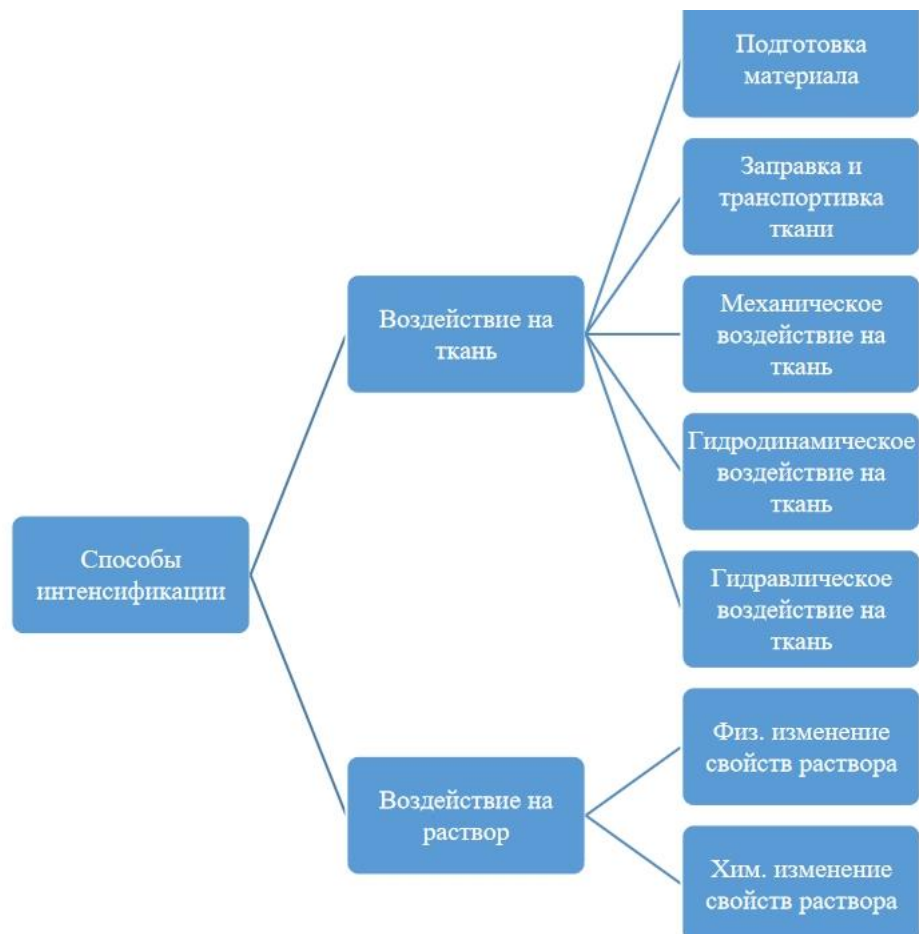


Рисунок 1.5 - Структурная схема основных способов интенсификации процесса промывки [17]

Для упорядочивания экспертной оценки методов интенсификации процесса промывки в [17] использовался метод ранжирования, согласно которому наиболее предпочтительному методу (группе методов) присваивался первый ранг, а наименее предпочтительному - последний. Критерии, по которым оценивали методы интенсификации: техническая эффективность, экономическая эффективность, технологичность в эксплуатации, время внедрения в производство, экологическая безопасность. Согласно исследованию, высоковольтные разряды в жидкости имеют средний ранг 2,2 по технической эффективности и 1,3 по экономической эффективности, что делает особенно актуальными исследования в данной области.

Выбор способа интенсификации процесса также зависит от типа технологической задачи. Технологическую задачу можно классифицировать по

различным признакам. Так, по виду загрязнения различают промывку от щелочи (после мерсеризации), промывку от красителей (после крашения и печати) [1].

Как отмечено в параграфе 1.2, по признаку лимитирующей стадии массообмена различают внутреннюю, внешнюю и смешанную задачи. В случае внешней задачи целесообразно применение гидродинамических методов интенсификации процессов с активизацией гидродинамических режимов, которая достигается с помощью применения закрученных потоков, барботажа и т.д. В случае внутренней задачи возможно осуществление интенсификации процесса с помощью использования различных физических полей (ультразвукового, магнитного) [1]. Между внутренней и внешней задачами промывки имеются тесные взаимосвязи, приводящие иногда к невозможности их отдельного рассмотрения и к необходимости совместного учета обеих стадий процесса - решению смешанной задачи [17]. В случае смешанной задачи имеют место и гидродинамические методы и использование физических полей [1].

Высокая энергоемкость является основным недостатком разрабатываемых методов экстрагирования, так как в большинстве случаев ускорения массопереноса, подводимая энергия проходит несколько стадий перед превращением в кинетическую энергию жидкости. Такие установки имеют низкий коэффициент полезного действия [52, 53].

Основным недостатком традиционных влажностных процессов в текстильной промышленности является то, что они требуют большого количества воды и энергии и затрачивают значительное время. Ускорение этих процессов (например, работа при повышенных температурах) не всегда возможно из-за нежелательных побочных эффектов. В большинстве текстильных влажностных процессов преобладают механизмы переноса массы, диффузия и конвекция в порах ткани. Предыдущие исследования показали, что эффективность этих процессов может быть улучшена с помощью ультразвука. Несмотря на значительные исследования, точный физический механизм этих процессов пока неизвестен. Большинство исследований в этой области было сосредоточено в основном на результатах без изучения фактического механизма [54].

В процессах промывки текстильных материалов массопередача и массоперенос часто ограничены по времени. Поэтому эти процессы требуют длительного времени для их совершения, большого количества воды и химических веществ, а также они потребляют энергию. В большинстве из этих процессов, диффузия и конвекция внутри и между нитями ткани являются ограничивающими механизмами массопереноса. Интенсификация массопереноса, преимущественно в порах внутри текстильного материала, является ключом к повышению эффективности влажностных текстильных процессов. Обычные способы интенсификации массопереноса (например, работа при повышенных температурах) не всегда возможны из-за нежелательных побочных эффектов, таких как повреждение ткани [55].

Интенсификация промывки ткани с использованием физических полей

Физическое воздействие может оказываться на рабочие растворы и на текстильные материалы путем использования ультразвуковых, магнитных, электрических и вибрационных полей.

Одним из перспективных способов решения этой задачи является интенсификация промывки ткани с помощью воздействия физических полей (электрического и ультразвукового) на этот процесс. Положительный эффект этого воздействия обусловлен, главным образом, снижением диффузионного сопротивления переносу технологического загрязнения из ткани в промывной аппарат. Практическая же реализация этого способа интенсификации процесса промывки связана с необходимостью экспериментального определения его режимных и конструктивных параметров, что возможно на основе соответствующего математического описания.

Импульсные методы заключаются в том, что обрабатываемый материал и технологическая среда подвергаются кратковременным и, как правило, часто повторяющимся воздействиям порций энергии, получаемой от различных источников: механических, пневматических, гидравлическим, генераторов импульсных напряжений и токов и др. (напр., для акустических воздействий обычно используют колебаний инфразвукового и ультразвукового диапазонов),

при этом внешний массообмен при использовании этих методов интенсифицируется благодаря турбулизации пограничного слоя [56].

Для повышения эффективности процесса экстрагирования используют интенсивное гидромеханическое и гидроакустическое воздействие. Один из примеров аппаратуры, реализующей многофакторное импульсное гидродинамическое воздействие на обрабатываемую суспензию, - это роторные импульсные аппараты (РИА). Они применяются для усиления процессов диспергирования, эмульгирования, растворения, экстрагирования и деструкции веществ [57].

В ряде работ показано, что ультразвуковое воздействие позволяет интенсифицировать экстрагирование технологических загрязнений из текстильных материалов [26, 44, 45, 53–55, 58–64].

В учебном пособии В.В. Сафонова [65], посвященном методам интенсификации химико-текстильных процессов отделочного производства, изложены способы интенсификации различных отделочных процессов, в том числе с помощью физических факторов, таких как СВЧ, ультразвук и пр. В процессах отделки текстильных материалов при ультразвуковом излучении наиболее значимыми факторами являются: кавитация, акустические течения, давление звукового излучения, звукокапиллярный эффект. Эффективность воздействия зависит от параметров звукового поля: частоты колебаний, интенсивности звука, и от свойств раствора: вязкость, упругость насыщенного пара, поверхностное натяжение, газосодержание. Вероятно, наиболее важное влияние оказывает кавитация, так как при схлопывании возникают микроударные воздействия.

В работе М.А. Промтова проведен анализ кавитационного воздействия на жидкость [66]. Было показано, что кавитация значительно усиливает различные химико-технологические процессы в жидкостях. В работе приведены примеры использования кавитационных технологий для повышения эффективности гидромеханических и массообменных процессов, а также разрушения веществ.

В [62] Установлено, что применение ультразвука приводит к уменьшению общего сопротивления процессам массопереноса при промывке, при этом

продолжительность процесса промывки хлопчатобумажной ткани от гидроксида натрия после мерсеризации сокращается на 35% (рисунок 1.6). Кроме того, при использовании ультразвукового воздействия на промывной раствор при промывке тканей может быть снижена концентрация моющего средства (ПАВ) в промывном растворе, особенно при применении смеси (ПАВ). Это обусловлено тем, что ультразвук способствует увеличению пенообразующей и эмульгирующей способности моющих средств.

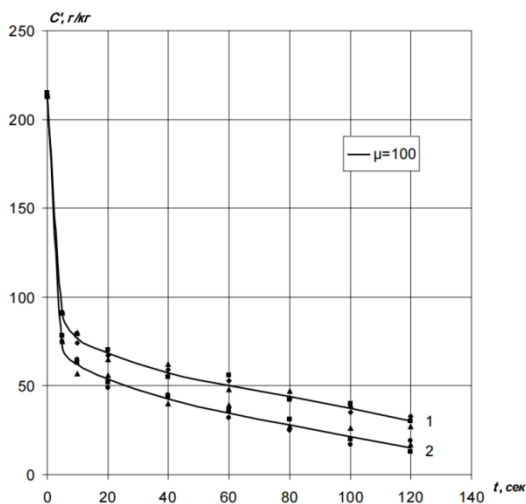


Рисунок 1.6 - Кинетика промывки хлопчатобумажной ткани Миткаль без интенсификатора и при использовании ультразвукового воздействия на промывной раствор на расстоянии 5 мм от обрабатываемого образца:

1 - без применения интенсификатора (ультразвука), 2 - с применением интенсификатора (ультразвука).

Количественная оценка влияния физических полей на кинетику процесса экстрагирования технологических загрязнений из тканей необходима, поскольку на её основе возможен расчёт производительности промывного оборудования, оценка энергоресурсосбережения, прогноз повышения экологической безопасности интенсифицированного процесса промывки за счёт снижения загрязнённости сточных вод химическими реагентами.

Кинетические коэффициенты можно определять на основе экспериментальных кривых кинетики промывки, полученных на модельных установках без интенсификации и с интенсификацией процесса выбранными физическими полями.

Интенсификация процессов экстракции направлена на ускорение массообмена в системе твердое-жидкость. По этому пути осуществляется поиск и внедрение новейших методов интенсифицирующих массообмен, в основе которых, как показывает анализ, лежит передача системе твердое тело-жидкость вибраций, пульсаций, колебаний различных частот и амплитуд.

В [63] показано, что введение обработки ультразвуком при предварительной обработке, а также при крашении и отделке текстиля, безусловно, дает положительный эффект в снижении потребности в красителях и химикатах, времени обработки, а также в использовании энергии и воды и играет роль в улучшении устойчивости химической обработки текстиля за счет снижения потребности во вспомогательных химикатах (например, выравнивающих агентах, электролитах и т. д.), потребления энергии и воды, а также увеличения поглощения красителей, что приводит к снижению содержания загрязняющих веществ в сточных водах.

В работах В.В. Сафонова [64, 65, 65] также исследовалась возможность применения ультразвука в качестве интенсификатора процессов отделочного производства. В [64] исследовалось влияние ультразвука на удаление белковых загрязнений из хлопчатобумажных тканей. Из исследования следует, что применение ультразвука позволяет получить высокие показатели по удалению белковых загрязнений с поверхности текстильных материалов.

Известен также способ интенсификации процесса промывки тканей с помощью использования магнитного поля. В [67] описан способ обработки водного раствора для промывки хлопчатобумажных тканей путем нагревания водного раствора и воздействия на него магнитным полем. В [1, 68, 69] установлено, что применение омагниченного раствора в качестве интенсификатора процесса промывки шерстяных тонкосуконных тканей позволяет сократить продолжительность процесса промывки для шерстяных тканей различной плотности с добавлением синтетических волокон на 14 – 25%, что составляет 25 – 37 минут при общей продолжительности периодического процесса промывки от 3-х до 4-х часов. Омагничивание широко используется в качестве интенсификатора

процессов отделочного производства, в т.ч. для повышения эффективности процесса крашения, подготовки воды [70, 71].

В химической технологии отделки текстильных материалов в качестве интенсификатора процессов отделочного производства используют сверхвысокие частоты (СВЧ). Так, в диссертационной работе О.Г. Циркиной исследовано повышения эффективности технологий отделки текстиля с использованием поля токов высокой частоты [72]. В работе, в т.ч. указывается, что ВЧ-обработка тканей увеличивает кинетическую подвижность отделочных препаратов в волокне. Представлены режимы ВЧ-обработки тканей, рекомендованные для проведения различных этапов отделочного производства.

Методы, основанные на применении электрических полей

Известно также, что воздействие электрических разрядов позволяет интенсифицировать процессы экстрагирования различных веществ, в частности, из растительного сырья, что показано в ряде работ [34, 52, 53, 73, 74]. В [75] был изучен механизм массообменных процессов, происходящих при жидкостной обработке текстильных материалов и доказана принципиальная возможность применения для их интенсификации высоковольтного разряда в жидкости.

Имеются отдельные публикации по интенсификации этим способом процессов экстрагирования технологических загрязнений из волокнистых материалов, например, в первичной переработке шерсти [76]. В таблице 1.8 приведены результаты очистки 1 кг однородной шерсти от жиропота до требований ГОСТ при использовании для ее промывки электрических высоковольтных разрядов [76].

Таблица 1.8 - Результаты очистки

Состояния шерсти	Количество жиропота	
	Однородная шерсть	Смешанная шерсть
Исходное	12,5	6,71
После третьей ступени	1,77	0,97
После пятой ступени	0,94	0,65

В последние годы во многих отраслях промышленности находят все большее применение новые электрофизические методы обработки материалов, характеризующиеся большой концентрацией энергии, высоким давлением и

температурой. К таким процессам относится высоковольтный электрический импульсный разряд в жидкости, практическое применение которого в различных технологических процессах производства впервые предложил советский ученый Юткин Л.А., назвав это явление электрогидравлическим эффектом [77].

В [78] была разработана технология очистки шерстяного волокна от природных примесей с использованием электроразрядной нелинейной объемной кавитации. В [77] отмечено, что электроразрядная обработка (ЭРО) способствует повышению качества промытой шерсти путем снижения свойлачиваемости шерсти. В [79] рассмотрены вопросы, связанные с возможностью применения электроразрядной нелинейной объемной кавитации при очистке шерстяного волокна от жиропота, различного рода минеральных и растительных примесей. Установлено, что в результате ЭРО шерсти происходит модификация поверхности волокон, внешне выражающаяся в сглаживании поверхности кутикулы [79, 80]. Доказано, что в процессе ЭРО сохраняются все природные свойства волокон. Установлено, что при очистке шерсти по разработанной технологии прочность волокон практически не снижается [79].

В [81] представлены результаты изучения влияния предварительной высокоэнергетической дискретной обработки шерстяного волокна на скорость экстракции шерстного жира. Определены физико-химические свойства полученного шерстного жира: кислотное число, пероксидное число, температуры плавления и застывания, pH водной вытяжки. На основании полученных результатов представлен вероятный механизм интенсифицирующего воздействия высокоэнергетической дискретной обработки в процессе предварительной обработки шерстяного волокна.

В [82] разработана двухстадийная технология очистки шерсти от природных загрязнений на основе применения высокоэнергетической дискретной обработки. Определены оптимальные параметры предложенной технологии. Установлено, что предварительная высокоэнергетическая дискретная обработка шерсти в течение 3 мин. на стадии промывки позволяет достичь необходимой степени очистки шерсти,

а также улучшить физико-химические характеристики и степень извлечения шерстного жира.

В [83] рассмотрено влияние высоковольтных импульсных электрических разрядов (ВИЭР) на изменение капиллярности, критической поверхностной энергии, степени удаления воскообразных веществ, а также влагообменных свойств и поровой структуры хлопчатобумажного текстильного материала, подготовленного по холодному способу. Установлено, что под действием ВИЭР улучшаются капиллярные и влагообменные свойства хлопчатобумажной ткани и возрастает степень удаления воскообразных веществ (таблицы 1.9, 1.10).

Таблица 1.9 - Содержание воскообразных веществ в волокне

Способ обработки	Содержание восков, %	Степень удаления, %
Суровая ткань	1,49	-
Холодное беление	1,49	0
Высокотемпературный способ подготовки	0,18	87,92
ВИЭР	0,55	63,09

Таблица 1.10 - Влагообменные свойства хлопчатобумажного текстильного материала

Способ обработки	Дифференциальное влагосодержание, W, %			
	гигроскопическая влага	полная влагоемкость	адсорбированная влага	
			полислой	монослой
Холодное беление	23,0	92,3	11,6	4,2
ВИЭР	25,0	105,3	14,8	5,5

В [84] рассмотрены исследования электроразрядной обработки льняного волокна с целью удаления из него нецеллюлозных веществ (пектинов, лигнина, парафинов и смол). Особое внимание уделено особенностям кинетики удаления нецеллюлозных веществ из льняного волокна (рисунок 1.7).

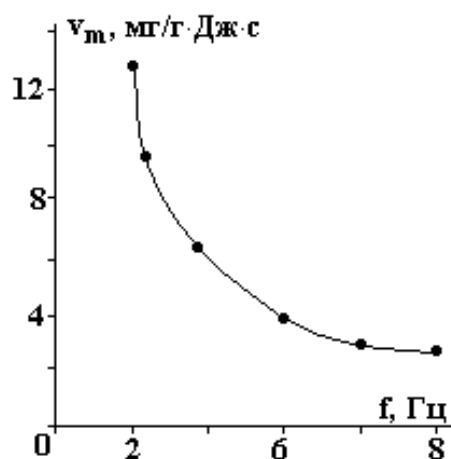


Рисунок 1.7 - Зависимость скорости удаления нецеллюлозных веществ из начально-сухого волокна от частоты посылок импульсов

В [85] разработана экспериментальная установка для обработки необработанных шерстяных волокон посредством импульсного электрогидравлического разряда. Шерстяные волокна были подвергнуты различному количеству обработок импульсного электрогидравлического разряда, и было исследовано и обсуждено влияние обработок на степень белизны, тонины, прочность волокна, состав сточных вод, химическую структуру, морфологию поверхности шерсти и адсорбцию красителя. Оценка степени белизны показала, что метод эффективен при очистке шерсти.

Электрические разряды используют также для придания джинсовой ткани эффекта «старения» [86]. В работе рассматривается обработка коронным разрядом окрашенных индиго хлопчатобумажных тканей при различных уровнях мощности и количестве проходов.

В [85] исследовался процесс беления шерстяного волокна с использованием электрических разрядов в жидкости. Показано, что метод позволяет достичь результата при комнатной температуре без использования каких-либо химических веществ в процессе. Авторы также связывают эффективность метода с процессом кавитации и увеличением турбулентной диффузии.

В [87] описаны исследования по возможности использования способа электрохимической активации технической воды, применяемой в отделочном производстве, и влияние ее на качество промывки. Испытаниям подвергалась ткань полульняная, предварительно пропитанная раствором едкого натра. Промывными

растворами служили активированная (щелочная и кислотная) и неподготовленная вода и выявлено значительное влияние активированного раствора на качество промывки ткани.

В работах проф. В.И. Чурсина с соавторами [88–90] исследовались физико-химические свойства электроактивированной воды. Указывается, что электроактивация воды позволяет интенсифицировать различные технологические процессы на производствах легкой промышленности. В [89] исследовали влияние электроактивации воды, что позволяет получать растворы с требуемыми окислительно-восстановительными и кислотно-основными свойствами. Также в [89, 91] указывается, что в результате электроактивации воды уменьшается поверхностное натяжение воды. В зависимости от электрохимической обработки (катодная или анодная) такие показатели как: электропроводность, количество растворенного кислорода и окислительно-восстановительный потенциал изменяются в большую или меньшую сторону по сравнению с необработанной водой.

Таким образом, в литературе встречается довольно большое количество работ, связанных с исследованием увеличения эффективности массообменных процессов в системе твердое-жидкость с использованием в качестве интенсификатора импульсного электрического поля. Однако, эти работы зарубежных и российских авторов посвящены экстрагированию различных компонентов из растительных веществ (напр., извлечение ценных лекарственных компонентов, биологически активных веществ из растительного сырья). Работы, связанные с интенсификацией процесса экстрагирования из волокнистых материалов, проводились для процесса промывки шерсти от жировых веществ и других загрязнений на стадии первичной переработки. При этом нет данных по кинетике изученных процессов и их количественному описанию.

Работы по исследованию кинетики массообменного процесса промывки тканей от технологических загрязнений и количественная оценка его интенсификации импульсным электрическим полем не проводились.

Химические методы интенсификации процессов отделки текстильных материалов

Одним из способов повышения эффективности процесса промывки текстильных материалов является интенсификация с помощью применения различных поверхностно-активных веществ. Положительный эффект этого воздействия обусловлен, главным образом, снижением диффузионного сопротивления переносу загрязненных частиц или частиц красителя из ткани в промывной раствор [92].

Для промывки текстильных материалов, окрашенных или напечатанных дисперсными красителями, рекомендуется широкий спектр неионогенных поверхностно-активных веществ. Общим их недостатком является большой расход моющих средств, что приводит к трудностям с очисткой сточных вод, значительные энергозатраты, связанные с необходимостью использования воды с высокой температурой, и возможность заполаскивания белого фона [93].

Однако поверхностно-активные вещества являются мощным загрязнителем окружающей среды, в частности - сточных вод. Поэтому их использование следует по возможности сокращать.

В [94] описано использование жидких эмульсионных мембран для удаления красителей из текстильных материалов. Эмульсию готовили с использованием Span 80 в качестве поверхностно-активного вещества, керосина в качестве разбавителя и хлористого водорода в качестве раствора внутренней фазы.

В [93] исследован способ интенсификации непрерывных режимов промывки волокнистых материалов путем использования эмульсий органических растворителей и воды.

В [95] рассмотрены вопросы очистки поверхности хлопкового волокна от нецеллюлозных примесей за счет обработки в низкотемпературной плазме с использованием в качестве плазмообразующего газа воздуха.

Проблема выбора текстильно-вспомогательных веществ (ТВВ), в том числе для повышения эффективно процесса промывки, широко освещается в работах О.И. Одинцовой с соавторами [96–100].

В работе [96] была изучена оптимизация состава для промывки текстильных материалов, окрашенных гидролизованнми активными красителями разного состава. Для достижения максимальной степени связывания гидролизованных форм красящих веществ рекомендовано использовать смесь катапава и каустимина в пропорции 1:5 при общей концентрации 12 г/л. Также было проведено сравнительное исследование различных методов промывки тканей, окрашенных непрерывным запарным способом. Для текстильного производства рекомендуется использовать технологическую схему промывки, которая включает обработку холодной и горячей водой, а также раствором катионного композита при температуре 25°C.

Биохимические методы интенсификации процессов отделки текстильных материалов

На современном этапе развития химико-текстильных производств при решении многих проблем совершенствования существующих и создания новых технологий отделки текстильных материалов особая роль отводится биохимическим приемам обработки. Это и направленная очистка волокон от естественных спутников и примесей, смягчение, модифицирование и полировка их поверхности, усиление эффектов отбеливания, промывка и многие другие приемы резкого повышения скоростей процессов, добротности и качества готовой продукции [101].

Диапазон ферментов, доступных для применения при влажной обработке текстиля, продолжает расширяться. Ферменты - это биокатализаторы на основе высокомолекулярных белковых структур. Биологическая обработка - это процесс отделки целлюлозного текстиля, который дает стойкий эффект за счет использования ферментов. Биообработка удаляет торчащие волокна из ткани, значительно уменьшает катышки, смягчает ткань и придает ей гладкость.

Многие синтетические волокна сейчас широко используются в текстильной промышленности. Однако из-за их гидрофобной природы их неудобно носить, что также приводит к накоплению статических зарядов и удержанию пятен. Таким образом, химическая модификация поверхности волокна позволила бы преодолеть

эти отрицательные свойства и придать волокнам желаемые характеристики. В качестве альтернативы можно использовать ферменты для модификации поверхности волокна. Основная цель ферментативной модификации поверхности синтетических тканей, таких как полиэстер, полиамид и т.д., - повысить их гидрофильность. На объемные свойства этих волокон это не влияет, поскольку используемые ферменты слишком велики, чтобы проникнуть в объемную фазу материала.

Амилазы применяют для декорирования с середины прошлого века. Ферменты, используемые в составах моющих средств, также успешно использовались в течение последних 40 лет. Применение целлюлаз для отделки джинсовой ткани и лакокрасочных материалов для обесцвечивания текстильных стоков и отбеливания текстильных изделий - это самые последние коммерческие достижения. Новые разработки основаны на модификации натуральных и синтетических волокон. Достижения в области энзимологии, молекулярной биологии и методов скрининга открывают возможности для разработки новых процессов на основе ферментов для более экологически безопасного подхода в текстильной промышленности [102].

Широко распространено также применение фермента пектиназы при промывке хлопчатобумажной ткани [103]. Было обнаружено, что водопоглощающая способность ткани, подвергнутой биологической очистке, оказалась значительно выше, чем у ткани, подвергнутой обычной очистке. Кроме того, было обнаружено, что прочность на разрыв хлопчатобумажной ткани выше для образца, обработанного ферментом пектиназой, чем для образца, обработанного традиционным способом.

В работах А.В. Чешковой также освещаются вопросы ферментативной обработки волокон и текстильных материалов [104–106].

В [106] было проведено сравнение технических, фунгицидных и защитных свойств котонина при различных методах разволокнения. В ходе эксперимента было установлено, что стойкость волокон к биоповреждениям зависит от их физико-химических характеристик и химического состава. Полученные

результаты позволяют заключить о целесообразности использования ферментной технологии котонизации с последующей промывкой. Этот метод обеспечивает селективное разрушение и удаление нецеллюлозных полисахаридов, сохраняя при этом естественный биоцид - лигнин.

В [105] описывается метод многоступенчатой промывки напечатанных целлюлозосодержащих тканей, заключающийся в обработке на первом этапе водным раствором ферментного препарата и неионогенного поверхностно-активного вещества в количестве 0,1-0,5 г/л при температуре 30-40°C, а затем последующей промывке горячей водой сначала при 40-50°C, а затем от 70-75°C до 60-65°C. Этот метод позволяет улучшить удаление загустки, снизить жесткость ткани, и снизить температуру обработки, сэкономив при этом моющие средства.

1.5 Особенности массопередачи при электроразрядном экстрагировании

При электроразрядном экстрагировании технологического загрязнения из текстильного материала будет рассматриваться массообмен для системы с твердой фазой (ткань).

В процессах массообмена с твердой фазой наряду с переносом веществ в жидкой фазе происходит перемещение вещества в твердой фазе за счет диффузии (массопроводности) [107].

Электрические разряды в жидкости вызывают интенсивную турбулизацию внешней фазы, а также локальное вскипание жидкости, в результате чего возникают явления кавитации, ударные волны [23, 52]. Эти явления оказывают влияния как на внешний, так и на внутренний массоперенос [23]. Так, внутренний массоперенос во внутрипоровой жидкости в данном случае происходит уже не только путем молекулярной диффузии, но и за счет турбулентной диффузии [23].

Расчет кинетики электроразрядного экстрагирования возможен на основе уравнения массопередачи и на основе дифференциального уравнения массопроводности. Первый случай применим для расчета в том случае, когда рассматривается единичная частица обрабатываемого сырья (и тогда используется

модифицированное уравнение массопередачи), второй - когда частицы имеют форму, приближенную к форме неограниченной пластины (решается уравнение массопроводности, применительно к среднеобъемному массосодержанию распределяемого вещества в частице твердой фазы) [23].

Волокно можно рассматривать как бесконечный цилиндр, а ткань - как бесконечную пластину, что, как правило, принимается в расчётах.

Расчет кинетики электроразрядного экстрагирования на основе уравнения массопередачи

При расчете кинетики электроразрядного экстрагирования на основе уравнения массопередачи предполагается, что твердая фаза обладает сорбционным эффектом по отношению к распределяемому веществу. В общем виде его записывают следующим образом:

$$d^2M = K_{с.т.}(C - C_{с.р.})dFd\tau = K_{с.ж.}(C_p - C_c)dFd\tau, \quad (1.28)$$

где d^2M - масса вещества, передаваемого на элементе поверхности раздела фаз dF за время $d\tau$, кг/м²с; $(C - C_{с.р.})$ - движущая сила процесса по твердой фазе, кг/м³; $(C_p - C_c)$ - движущая сила процесса по жидкой фазе, кг/м³; C - концентрация распределяемого вещества во внутрипоровой жидкости, кг/м³; $C_{с.р.}$ - равновесная ей концентрация распределяемого вещества в экстрагенте, кг/м³; C_c - концентрация распределяемого вещества в экстрагенте, кг/м³; C_p - равновесная ему концентрация распределяемого вещества в внутрипоровой жидкости, кг/м³; $K_{с.т.}$ - коэффициент массопередачи по твердой фазе, отнесенный к разности концентраций во внутрипоровой жидкости, кг/((кг/м³ жидкости)·м²·с); $K_{с.ж.}$ - коэффициент массопередачи по жидкой фазе, отнесенный к разности концентраций во внешней фазе, кг/((кг/м³ жидкости)·м²·с).

В случае, когда поверхность фазового контакта геометрически не определима, используют модифицированные формы уравнения массопередачи [52].

Также, для описания кинетики экстрагирования можно использовать не только массовые концентрации, но и массовые доли в твердой фазе и в экстрагенте [52].

Кинетика электроразрядного экстрагирования изучалась в работах [108–112]. В [109, 110] экспериментально рассчитывается объемный коэффициент массопередачи по твердой фазе.

В [23] указывается, что с увеличением удельной энергии E , вводимой в рабочий объем аппарата, коэффициент массопередачи пропорционально возрастает, так как увеличивается интенсифицирующее воздействие электрических разрядов на систему «твердое-жидкость».

Электроразрядное экстрагирование можно проводить при различных параметрах процесса. К таким параметрам относят: длительность импульса напряжения, длительность фронта импульса напряжения, длина межэлектродного промежутка, величина напряжения, частота подачи разрядов [23]. Все эти параметры оказывают влияние на коэффициент массопередачи.

С увеличением длительности импульса $t_{\text{и}}$ коэффициент массопередачи непрерывно увеличивается (объясняется увеличением времени воздействия разряда), однако когда $t_{\text{и}}$ выше 0,6 мкс это приводит к значительным потерям энергии на токи утечки [23].

При увеличении длины межэлектродного промежутка d до 1,5 мм коэффициент массопередачи возрастает, так как увеличивается зона охвата обрабатываемых частиц; однако при $d > 1,5$ мм происходит ослабление влияния процессов, происходящих при разряде [23].

При увеличении длительности фронта импульса $t_{\text{ф}}$ коэффициент массопередачи уменьшается из-за протекания токов утечки [23]. Длительность фронта импульса 5 нс считается оптимальным, так как формирование более короткого фронта требует усложнения установки.

С увеличением частоты подачи импульсов f от 1 до 5 Гц коэффициент массопередачи возрастает, что объясняется более интенсивным воздействием электрических разрядов на процесс экстрагирования [23].

При напряжении до 32 кВ коэффициент массопередачи возрастает, при значениях $U > 32$ кВ коэффициент массопередачи уменьшается [23].

Расчет кинетики электроразрядного экстрагирования на основе решения дифференциального уравнения массопроводности

Расчет кинетики электроразрядного экстрагирования на основе решения дифференциального уравнения массопроводности применим в том случае, когда частицы твердой фазы близки по форме к пластине, цилиндру или шару [23]. Расчетными уравнениями в этом случае являются решения уравнения массопроводности применительно к среднеобъемному массосодержанию распределяемого вещества в частице твердой фазы. Так как решения при граничном условии 3-го рода для пластины, цилиндра и шара затруднительны при электроразрядном экстрагировании из-за отсутствия критериальных уравнений для расчета коэффициентов массоотдачи, то, учитывая интенсивный внешний массообмен в данном процессе, принимается граничное условие 1-го рода (концентрация распределяемого вещества в твердом теле у его поверхности принимает равновесное значение), и в этом случае для кинетического расчета используют решения уравнения массопроводности при $Bi_m^* \rightarrow \infty$ [23]. Расчет проводят зональным методом, так как в периодическом процессе электроразрядного экстрагирования концентрация распределяемого вещества во внешней фазе непрерывно повышается [23].

Цели и задачи исследования

В химической технологии отделки тканей их промывка от различных технологических загрязнений является во многом определяющей качество готового материала ресурсоёмкой операцией, которая сопровождает практически каждую технологическую стадию в химической технологии отделки тканей.

Большое значение для процессов массопереноса имеют свойства текстильного материала как объекта технологической обработки, в том числе сорбционно-структурные свойства. В цехах отделочного производства одним из широко применяемых реагентов при операциях мерсеризации, беления, отварки

является гидроксид натрия, поэтому этот реагент выбирается в качестве модельного загрязнения при исследовании процесса промывки.

В ходе массопередачи при экстрагировании распределяемое вещество перемещается как внутри структуры твердого тела (массопроводность), так и с поверхности твердого тела в жидкую среду (массоотдача). Тип задачи массообмена определяется с использованием критерия Био массообменного. От типа задачи зависит выбор способа интенсификации процесса.

Достаточно многочисленные работы зарубежных и российских авторов посвящены экстрагированию различных компонентов из растительных веществ, в частности, извлечению ценных лекарственных компонентов, биологически активных веществ из растительного сырья. Работы, связанные с интенсификацией процесса экстрагирования из волокнистых материалов, проводились для процесса промывки шерсти от жировых веществ и других загрязнений на стадии первичной переработки. При этом нет данных по кинетике изученных процессов и их количественному описанию.

Работы по исследованию кинетики массообменного процесса промывки тканей от технологических загрязнений и количественная оценка его интенсификации импульсным электрическим полем не проводились.

Целью диссертации является повышение и оценка эффективности процесса промывки хлопчатобумажных тканей с воздействием импульсного электрического поля.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие **задачи**:

- обоснован выбор объекта исследования и метода интенсификации процесса промывки на основе анализа отечественных и зарубежных работ;
- проведена оценка и аппроксимация сорбционных характеристик хлопчатобумажных тканей;
- выполнены экспериментальные исследования кинетики процесса промывки, в том числе с ИЭП;

- дана количественная оценка интенсифицирующего эффекта от воздействия ИЭП на кинетику промывки хлопчатобумажной ткани после мерсеризации на основе сравнения коэффициентов массоотдачи и массопроводности;
- разработана математическая модель интенсифицированной промывки, позволяющая оценить ее кинетику в технологических задачах;
- осуществлена оценка ресурсоэффективности и экологической безопасности промывки тканей с ИЭП при сокращении затрат электроэнергии, чистой промывной воды, поверхностно-активных веществ.

ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОМЫВКИ ТКАНЕЙ

2.1 Математическое описание интенсифицированного импульсным полем процесса экстрагирования технологических загрязнений из плоских волокнистых материалов

Математические модели одного из основных массообменных процессов - процесса экстрагирования из твёрдой фазы непрерывно развиваются, при этом учитываются различные аспекты, существенные для процесса экстрагирования. Моделирование процесса экстрагирования технологических загрязнений из текстильных материалов - процесса промывки менее развито, поэтому математические модели и методы расчёта представляют особый интерес.

Для математического описания процесса промывки тканей используется диффузионная модель удаления частиц (незакрепленного красителя, щёлочи, моющих и жировых веществ и др.) из волокнистого субстрата.

Математическая модель процесса промывки тканей в высокоскоростных промывных машинах записана в 1D постановке. Предполагается, что перенос частиц загрязнения осуществляется преимущественно вдоль координаты x - перпендикулярно поверхности ткани (рисунок 2.1).

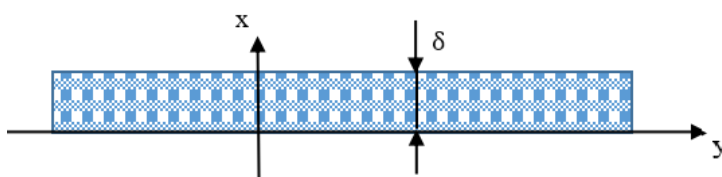


Рисунок 2.1 - Расчётная схема

Математическая модель включает уравнение диффузии, начальные и граничные условия [37]:

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (2.1)$$

$$c(x, 0) = c_0 \quad (2.2)$$

$$D \frac{\partial c}{\partial x} \Big|_{x=0} = \beta(c|_{x=0} - c_p) - J_c \quad (2.3)$$

$$-D \frac{\partial c}{\partial x} \Big|_{x=\delta} = \beta(c|_{x=\delta} - c_p) - J_c \quad (2.4)$$

Здесь c – концентрация удаляемого из ткани технологического «загрязнения» (кг/м³); τ – время (с); x – текущая координата (м); D – коэффициент диффузии (м²/с); β – коэффициент массоотдачи (м/с); J_c – величина плотности потока массы загрязнений, обусловленная интенсифицирующим воздействием, (кг/м²·с); c_p – равновесная концентрация загрязнений, (кг/м³); δ – толщина ткани (м).

Граничные условия 3 рода (2.3-2.4) записаны в специальной форме, следуя работе [113], в которой величина J_c определяет интенсивность потока массы загрязнений на внешних границах материала за счёт формирования здесь турбулентных течений:

$$J_c = \frac{\rho_{тз}}{\beta} \sqrt{\frac{\chi J}{l \rho_{тк} U}} \quad (2.5)$$

где ρ – плотность (кг/м³); J – интенсивность импульсного воздействия определённого типа (Вт/м³); U – скорость распространения импульсного воздействия в обрабатываемой среде (м/с); l – расстояние от источника импульсного воздействия до обрабатываемого объекта (м); χ – коэффициент, учитывающий долю энергии интенсифицирующего воздействия, затрачиваемой на формирование турбулентных течений, способствующих разрушению диффузионного пограничного слоя. Индексы: тк – ткань; о – начало процесса; тз – тканевые загрязнения.

В данной работе интенсифицирующее воздействие связано с наложением импульсного электрического поля. Механизм такого воздействия пока не изучен в достаточной мере, поскольку он включает кавитацию, возможное повышение температуры рабочей жидкости, изменение её поверхностного натяжения и вязкости и др.

Рассмотрим приближенное аналитическое решение краевой задачи (2.1 – 2.4) применительно к среднему по сечению значению концентрации тканевых загрязнений $c(\tau)$ [37, 113, 114], справедливое для процесса промывки при значениях числа Фурье $F_0 = D\tau/\delta^2 > 0,3$.

$$c(\tau) = c_k + \frac{8}{\pi^2} (c_0 - c_p - c_J) \cdot \exp\left(-\left(\frac{\pi}{\delta}\right)^2 D\tau\right) \quad (2.6)$$

$$c(\tau) = \int_0^\delta c(x, \tau) dx; c_J = \frac{J_c}{\beta}; c_k = c_p.$$

Оценки показывают, что значения числа Фурье практически с начала процесса удовлетворяют условию $F_0 = D\tau/\delta^2 > 0,3$, т.е. практически весь период промывки ткани проходит в регулярном режиме.

Закономерность изменения средней по толщине концентрации загрязнения со временем (2.6) может быть использована для создания расчётных методик кинетики процесса промывки тканей. Уравнения подобного вида применяются достаточно широко для аппроксимации экспериментальных данных различных процессов сорбции-десорбции для тканых материалов, например [115, 116].

Ниже приводятся варианты использования данной закономерности. Один из вариантов учитывает преимущественно влияние интенсифицирующего воздействия на характеристики внутреннего массопереноса, а второй вариант учитывает влияние интенсифицирующего воздействия на массоперенос обоих типов одновременно (и внутренний и внешний).

Вариант 1. Следует отметить, что постановка задачи диффузии (2.1-2.4), выполненная в [113], учитывает интенсифицирующее воздействие на внешних границах материала. При этом эксперименты свидетельствуют, что, в частности, воздействие импульсным электрическим полем увеличивает скорость удаления загрязнений по всему объёму материала. Поэтому в данной работе предложена модификация кинетической зависимости (2.6), которая выражается в дополнительной поправке к коэффициенту диффузии χ_J :

$$c(\tau) = c_k + \frac{8}{\pi^2} (c_0 - c_p) \cdot \exp\left(-\left(\frac{\pi}{\delta}\right)^2 D_J \tau\right) \quad (2.7)$$

$$D_J = \chi_J D.$$

Уравнение кинетики удаления загрязнений вида (2.7) учитывает преимущественное влияние интенсифицирующего воздействия на характеристики внутреннего массопереноса, когда $c_J \cong 0$.

Если интенсифицирующее воздействие отсутствует, то коэффициент $\chi_J = 1$, в противном случае $\chi_J > 1$.

Отметим, что вариант уравнения кинетики удаления загрязнений (2.7) может быть использован для описания вклада в процесс промывки интенсификатора любой природы.

Из рисунка 2.2 видно, что предложенная модель удовлетворительно описывает кинетику удаления щелочи при промывке лёгкой хлопчатобумажной ткани после мерсеризации как с интенсифицирующим воздействием наложенного импульсного электрического поля, так и без него. Толщина ткани $\delta = 0,00053$ м. Начальная концентрация щелочи $c_0 = 0,1284$ кг/кг. Значение равновесной концентрации загрязнения соответствует экспериментальному значению $c_p = 0,005$ кг/кг.

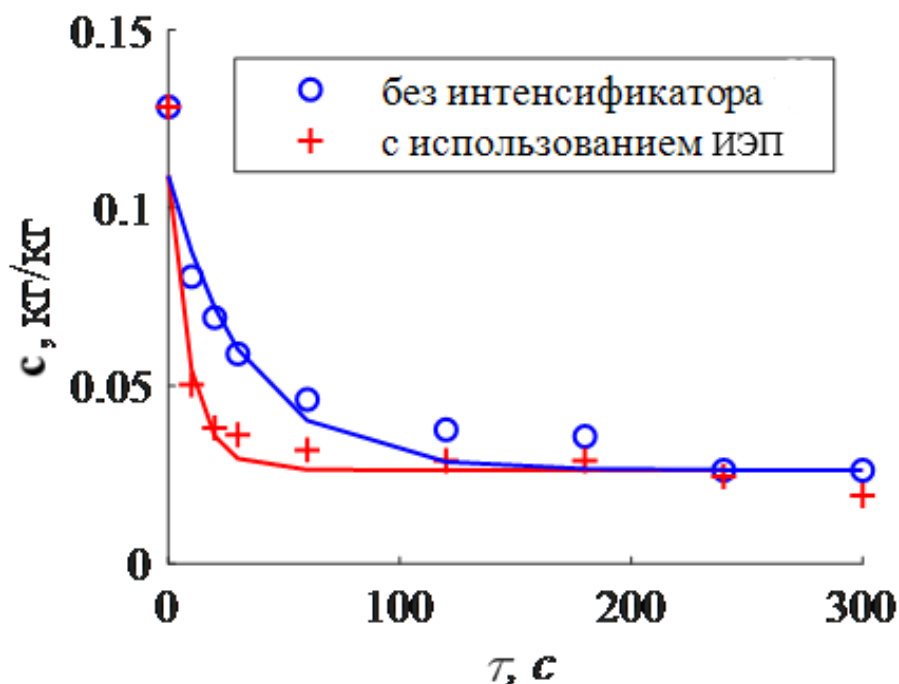


Рисунок 2.2 - Кинетические кривые промывки лёгкой хлопчатобумажной ткани после мерсеризации без воздействия и с воздействием электрических разрядов (ИЭП); $\circ$, $+$ – эксперимент, непрерывные кривые – расчёт по уравнению (2.7).

Коэффициенты в уравнении (2.7) получены методом наименьших квадратов. В процессе промывки ткани без интенсифицирующего воздействия $D_J = D = 1,1517 \cdot 10^{-9}$ м²/с, а при наличии интенсифицирующего воздействия

величина $D_J = 3,5850 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$. Таким образом, поправочный коэффициент, характеризующий эффективность воздействия импульсного электрического поля на процесс удаления технологического загрязнения, $\chi_J = 3,1$. Величина $c_k = 0,026$. Значения D , c_k и χ_J определены для всего периода процесса промывки.

Вариант 2. Кинетическое уравнение (2.7) учитывает преимущественное влияние интенсифицирующего воздействия на характеристики внутреннего массопереноса, а его влияние на внешний массоперенос не учитывается ($c_J \cong 0$). В данном варианте рассмотрено уравнение кинетики загрязнений с учётом влияния интенсифицирующего воздействия на массоперенос обоих типов одновременно (и внутренний и внешний). Вклад интенсифицирующего воздействия c_J по уравнению (2.6) определён зависимостью вида

$$c_J = c_{J0} - a_J \tau^{0,077}, \quad (2.8)$$

где константы $c_{J0} = 0,002513$, $a_J = 0,1167$.

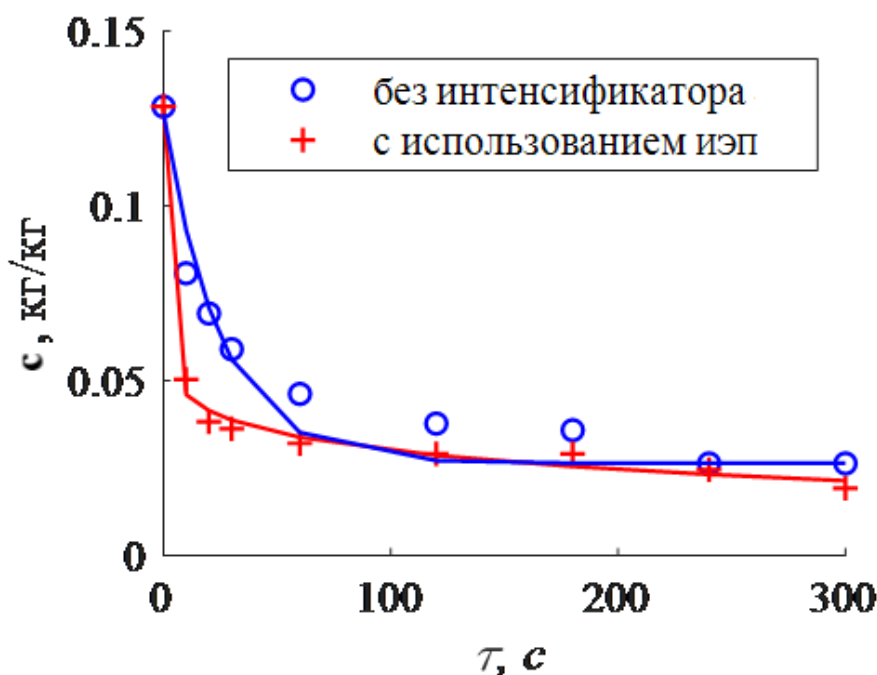


Рисунок 2.3 - Кинетические кривые промывки лёгкой хлопчатобумажной ткани после мерсеризации без воздействия и с воздействием электрических разрядов (ИЭП); $\circ$, $+$ – эксперимент, непрерывные кривые – расчет по уравнению (2.6) с учетом (2.8).

Аппроксимация на основе кинетического уравнения (2.6) с учетом (2.8)

получена при тех же значениях начальной и равновесной концентрации, что и аппроксимация на основе уравнения (2.7) (рисунок 2.3). При этом коэффициент массопереноса D , принимает значение $D = 6,5317 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2/\text{с}$, которое существенно меньше значения коэффициента диффузии (массопроводности) для процесса промывки без интенсификатора ($c_f = 0$, $D = 1,1517 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$).

Кинетическое уравнение (2.6) с учётом (2.8), описывает процесс промывки с интенсифицирующим воздействием и учитывает существенный вклад внешнего массопереноса.

По сути в работе предложен расчёт, который можно считать модификацией подхода к описанию процесса промывки на основе единого кинетического уравнения (обобщённого уравнения массопередачи) [1, 117].

Расчёты по предложенной модели, выполненные в программном комплексе Matlab, удовлетворительно описывают кинетику удаления технологических загрязнений из объекта промывки. Сумма квадратов отклонений экспериментальных значений от рассчитанных по аппроксимирующей зависимости для переменных, нормированных по начальным значениям, равна 0,08 (суммарно для зависимостей с учетом и без учета интенсифицирующего воздействия). Таким образом в работе показано, что использование кинетического уравнения (2.6) с учётом (2.8), описывает процесс промывки с интенсифицирующим воздействием и может быть рекомендовано для расчёта процесса промывки с любым импульсным интенсифицирующим воздействием.

2.2 Аппроксимация изотерм сорбции волокнистых материалов различными уравнениями

Математическое описание изотерм сорбции паров воды проводится с целью получения уравнений для определения равновесного влагосодержания при различных значениях относительной влажности воздуха, так как экспериментальное получение изотерм сорбции – десорбции является трудоёмким и продолжительным [118, 119].

Параметры пористого материала, определяемые по изотермам сорбции – десорбции, в частности размер и объём пор, являются эффективными характеристиками диффузионного сопротивления протеканию процесса массопередачи, которое оказывает пористая структура материала в массообменных процессах термовлажностной обработки отделочного производства, таких как промывка, пропитка и др. [1].

В таблицах 2.1 и 2.2 приведены сорбционно-структурные и другие характеристики природных и синтетических волокон, причем внутренняя поверхность и удельный объём пор определены методом адсорбции паров воды и метанола [1, 26].

Экспериментальные исследования проводились на вакуумно-сорбционной установке с весами Мак-Бена – Бахра при нормальных условиях.

Таблица 2.1 - Характеристики природных и синтетических волокон

Волокно	Площадь внутренней поверхности, м²/г		Объем пор, см³/г		Плотность, г/см³	Объемное набухание в воде, %	Влагопоглощение при 20 °С и φ = 65%
	по воде	по метанолу	по воде	по метанолу			
Натуральные волокна							
Хлопковое	94-137	20-82	0,130	0,142	1,52	45	7-9
Шелковое	140-212	170	0,248	0,217	1,37	—	—
Шерстяное	206	—	—	—	1,32	36-42	16-17
Химические волокна							
Триацетатное	41-59	148	0,120	0,184	—	12-18	4
Полиакрилонитрильное	20	23	0,030	0,050	1,17	—	—
Полиамидное	45-100	87	0,125	0,170	—	10-12	4,5
Полиэфирное	30	26	0,060	0,055	1,39	0,5-1,5	0,35
Полипропиленовое	26	17	0,045	0,047	0,93	0	0
Вискозное	204-288	3,6-104	0,275	0,229	1,48-1,51	95-120	13

Таблица 2.2 – Сорбционные свойства хлопкового волокна

Вид волокна	Максимальное сорбционное влагосодержание, %	Количество сорбированной влаги, % при φ = 0,7
Хлопок суровый	25,5	8,0
Хлопок мерсеризованный	29,0	9,5

Для описания изотерм сорбции – десорбции волокнистых материалов, в частности, было использовано уравнение, в основу которого положен геометрический подход к описанию S-образных кривых [1].

Применительно к описанию изотерм сорбции – десорбции называемое обобщённым уравнение [1] может быть представлено в виде:

$$U = \frac{1}{K(A - B)} \ln \frac{(A - \varphi_m + \varphi)(\varphi_m - B)}{(A - \varphi_m)(\varphi_m - \varphi - B)}, \quad (2.9)$$

где U – влагосодержание образца, %; φ – относительное давление водяных паров (относительная влажность воздуха); φ_m – максимальное значение φ ; A и B – соответственно правая и левая асимптоты к изотерме, выраженные в единицах относительного давления водяных паров; K – коэффициент пропорциональности.

Параметры A , B и K определялись на основе экспериментально снятых изотерм десорбции с использованием метода нелинейной регрессии. Анализ показал, что уравнение (2.9) можно использовать для оценки сорбционных свойств волокнистых материалов, однако в методе обработки экспериментальных данных заложены погрешности, возникающие при кусочно-линейной аппроксимации изотерм сорбции. Снижение такой погрешности может быть достигнуто путем увеличения числа экспериментальных точек изотермы сорбции, но это вызывает существенное увеличение продолжительности эксперимента.

Для расчёта процессов сорбции – десорбции паров воды волокнистыми материалами может быть использовано полуэмпирическое уравнение:

$$U = U_0 \exp[-(RT \ln \varphi)/E] n + \alpha(T - T_0), \quad (2.10)$$

где T – температура, при которой реализуется процесс; U , U_0 – текущая и равновесная влажность волокнистого материала; E , n , α – характеристические константы процесса; T_0 – температура, при которой определены характеристические константы.

На практике для описания S-образных изотерм сорбции – десорбции используется более простое уравнение, достаточно хорошо описывающее эти процессы в широком диапазоне режимных параметров. Уравнение может быть представлено в виде:

$$\varphi = 1 - \exp\left(-\frac{U^n}{A}\right), \quad (2.11)$$

где n и A – константы, зависящие от свойств капиллярно-пористого материала и условий процесса. Уравнение решено относительно U и представлено в виде:

$$U = [-A \ln(1 - \varphi)]^{1/n}. \quad (2.12)$$

Логарифмирование этого уравнения приводит к линейной зависимости:

$$\ln U = \frac{1}{n} \{[\ln - \ln(1 - \varphi)] + \ln(A)\}. \quad (2.13)$$

Таким образом, в координатах $\ln[-\ln(1 - \varphi)] - \ln U$ изотермы сорбции-десорбции представляют собой прямые линии, угловые коэффициенты которых и отрезок, отсекаемый на оси ординат, позволяют получить оценки параметров уравнения сорбции – десорбции [1, 120].

В ряде работ рассмотрены возможности описания сорбционных свойств хлопкового волокна, являющегося основой хлопчатобумажных тканей, уравнениями, часть которых имеет термодинамическое обоснование (уравнения Корнюхина, Цимерманиса) [12, 43, 120–123].

Рассмотрена возможность описания изотермы сорбции паров воды хлопковым волокном уравнением Гендерсона:

$$U = \left[-\frac{a}{T} \ln(1 - \varphi)\right]^b, \quad (2.14)$$

где a , b – эмпирические константы.

И на основе уравнения Цимерманиса для капиллярно-пористых материалов [43]:

$$U = U_{\text{мг}} \varphi^{a_0 k^{\varphi}}, \quad (2.15)$$

где a_0 и k – безразмерные постоянные, называемые соответственно структурной активностью капиллярно-пористого материала и коэффициентом приращения активности связи; $U_{\text{мг}}$ – максимальное гигроскопическое влагосодержание.

На рисунке 2.4 представлена опытная изотерма сорбции паров воды хлопковым волокном при $t = 22,5^\circ\text{C}$, а также результаты ее аппроксимации с помощью уравнений Гендерсона и Цимерманиса [123].

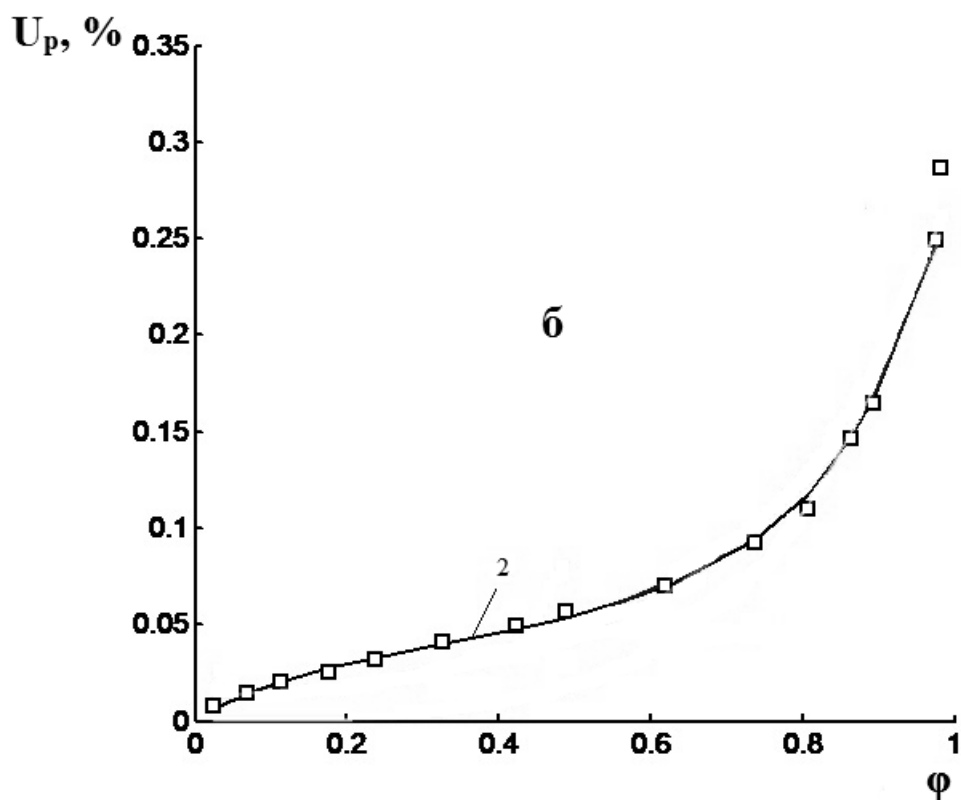
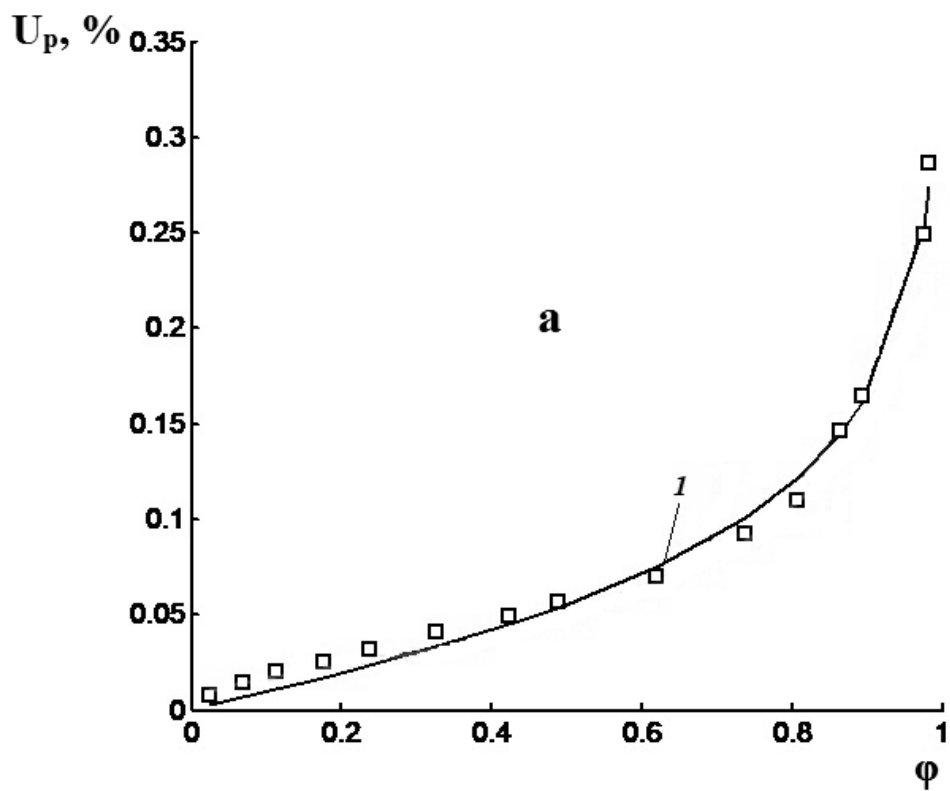


Рисунок 2.4 - Результаты аппроксимации экспериментальной изотермы сорбции для хлопкового волокна ($\square$) а) с помощью уравнений Гендерсона (1), б) Цимерманиса для капиллярно-пористых материалов (2)

Анализ показывает, что уравнение изотермы сорбции Цимерманиса для капиллярно-пористых материалов наиболее точно аппроксимирует экспериментальные сорбционные кривые различных волокнистых материалов.

Данная модель имеет наименьшую погрешность аппроксимации по сравнению с остальными рассмотренными уравнениями и может быть использована при определении равновесного влагосодержания хлопковых текстильных материалов во всем диапазоне изменения относительной влажности воздуха.

Именно это уравнение целесообразно использовать в расчётах процессов промывки, пропитки и других процессов термовлажностной обработки текстильных материалов.

2.3 Расчёт концентрации сорбированного хлопковым волокном загрязнения с учётом условий равновесия, рабочих концентраций пропиточного раствора и др.

Проведён анализ сорбционных характеристик ткани, обработанной раствором гидроксида натрия. Предложена методика расчёта концентрации сорбированного волокном загрязнения, с учётом условия равновесия, концентрации пропиточного раствора или общей концентрации технологического загрязнения в материале. Общее количество загрязнения в ткани после обработки растворами NaOH можно представить состоящим из двух частей: внутреннего и внешнего загрязнения. Внутреннее – это загрязнение, сортированное волокном. Внешнее загрязнение представляет собой пропиточный раствор, находящийся на поверхности, а также в порах пряжи и ткани.

Исходными данными для определения количества загрязнения, сорбированного волокном в процессе пропитки, являются: концентрация загрязнения в пропиточном растворе, общая концентрация загрязнения в материале и степень отжима ткани после пропитки.

Объектом исследования являлась хлопчатобумажная ткань с поверхностной плотностью $M = 0,150 \text{ кг/м}^2$ после её мерсеризации [124]. Образец ткани пропитывается раствором едкого натра с концентрацией 100 кг/м^3 , время

пропитки было больше времени достижения равновесия, концентрация щёлочи определяется методом обратного титрования.

Получено выражение, позволяющее рассчитать начальную концентрацию загрязнения, сорбированного волокном ткани:

$$C'_{\text{н.с.}} = \frac{C'_\text{н}(\rho K_p + C'_\text{н} - \eta)}{\rho K_p} \quad (2.16)$$

или через концентрацию загрязнения в пропиточном растворе:

$$C'_{\text{н.с.}} = \frac{C_{\text{пр}}[K_p(\rho + C_{\text{пр}}) - \eta]}{\rho} \quad (2.17)$$

где: ρ - плотность воды, кг/м³, $C'_{\text{н.с.}}$ - начальная концентрация сорбированного загрязнения в ткани после пропитки, кг/кг; $C_{\text{пр}}$ - концентрация загрязнения в пропиточном растворе, кг/м³; K_p - константа равновесия; η - степень отжима ткани после пропитки.

Из последнего соотношения можно определить величину константы сорбции загрязнения тканью:

$$K_c = \frac{C'_{\text{н.с.}}}{C_{\text{пр}}} = \left(K_p - \frac{\eta}{\rho}\right) + \frac{K_p}{\rho} C_{\text{пр}} \quad (2.18)$$

Из полученного выражения видно, что константа сорбции является линейной функцией концентрации загрязнения в пропиточном растворе. Это объясняется изменением плотности пропиточного раствора при изменении его концентрации.

Следует отметить, что в полученных соотношениях свойства хлопчатобумажных тканей как объектов промывки учитываются через константу равновесия. Поэтому значение этой константы необходимо определять экспериментально для каждой из исследуемых тканей.

Зная условия равновесия системы хлопчатобумажная ткань – пропиточный раствор, а также концентрацию пропиточного раствора или общую концентрацию загрязнения в материале, можно рассчитать концентрацию сорбированного волокном загрязнения.

Таким образом, получены уравнения для расчёта концентрации сорбированного волокном гидроксида натрия, что имеет практическое значение.

Анализ результатов теоретических исследований

Представлено математическое описание интенсифицированных процессов экстрагирования технологических загрязнений из плоских волокнистых материалов (тканей). Сформулирована краевая задача для процесса промывки плоских текстильных материалов, учитывающая влияние импульсного воздействия на обрабатываемую ткань. Предложен расчет, описывающий процесс промывки с интенсифицирующим воздействием, основанный на едином кинетическом уравнении, который можно считать модификацией подхода к описанию процесса промывки на основе обобщённого уравнения массопередачи, предложенного Б.С. Сажиним и В.А. Реутским. Модель применима для аппроксимации данных по кинетике интенсифицированных процессов промывки от технологических загрязнений в инженерных расчётах. Полученные уравнения удовлетворительно описывают процесс промывки с интенсифицирующим воздействием. Сумма квадратов отклонений экспериментальных значений от рассчитанных по аппроксимирующей зависимости для переменных, нормированных по начальным значениям, равна 0,08 (суммарно для зависимостей с учетом и без учета интенсифицирующего воздействия).

Обоснован выбор уравнения для аппроксимации экспериментальных сорбционных кривых хлопчатобумажных тканей. Показано, что для капиллярно-пористых материалов уравнение изотермы сорбции Цимерманиса наиболее точно аппроксимирует экспериментальные сорбционные кривые различных волокнистых материалов, в том числе хлопчатобумажных тканей.

Получены уравнения для расчёта концентрации сорбированного волокном гидроксида натрия.

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

3.1 Характеристика объекта исследования

Объектом исследования процесса промывки после мерсеризации являлась суровая хлопчатобумажная ткань бязь с поверхностной плотностью $M = 150 \text{ г/м}^2$, которая является типовым представителем легких хлопчатобумажных тканей. Для устранения влияния поверхностной плотности и толщины ткани на кинетику процесса исследовалась лёгкая ткань. Характеристики объекта исследования приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Характеристика объекта исследования [1]

Ткань	Поверхностная плотность, г/м^2	Число нитей на 10 см		Линейная плотность пряжи, текс		Переплетение
		по основе, По	по утку, Пу	по основе	по утку	
Бязь	150	272	227	25	36	полотняное

Хлопок – это натуральное волокно растительного происхождения, которое на 88-96% состоит из целлюлозы. Хлопчатобумажные ткани имеют уникальные санитарно-гигиенические свойства, которые объясняются его микропористостью. Хлопковые волокна имеют сложную морфологическую структуру, характеризующуюся своим составом и физической структурой [18]. Хлопковое волокно отличается тонкостью, сравнительной прочностью (разрывная длина $L_p = 25 \text{ гкм}$), гигроскопичностью (влажность $W = 8\text{-}9\%$), устойчивостью к многократным растяжениям и изгибам, высокой гигроскопичностью, хорошей окрашиваемостью, устойчивостью к действию щелочей [2]. Хлопчатобумажные ткани прекрасно пропускают воздух, хорошо стираются и их можно гладить при высокой температуре.

К недостаткам хлопкового волокна относят малую эластичность ($\epsilon_p = 6\text{-}8\%$) - ткани из таких волокон легко сминаются и вытягиваются [2].

Из хлопка изготавливают различные изделия: как бытовые (бельевые, плательные, костюмные ткани, тюль и т.д.), так и технического назначения – брезент, канаты и т.д [2].

Бязь – хлопчатобумажная ткань (х/б), имеющая особый способ переплетения нитей (полотняное, крест-накрест под углом 90°). Материал имеет высокую прочность. На данный момент используется для изготовления постельного белья, кухонного текстиля, одежды. Суровая бязь может использоваться для изготовления спецодежды, обивки мебели. Бязи бывают гладкокрашеными и печатными с мягкой и более жесткой отделкой. Бязь, являясь хлопковой тканью, гипоаллергенна. Бязи могут быть легко обработаны с помощью отделок, которые обеспечивают разнообразные потребительские свойства: плотность, необходимую жесткость, малую усадку, малую сминаемость, колористическое оформление, блеск, драпируемость [6].

В термовлажностных процессах химической технологии отделки текстильных материалов особое значение имеет такая характеристика тканей как изотермы сорбции-десорбции. С помощью изотерм сорбции-десорбции можно рассчитать эффективный радиус пор, общий объем пор в материале и распределение объема по радиусу, а также определить формы связи распределяемого компонента с материалом [62, 117]. Среди всех известных методов изучения пористой структуры материалов адсорбционный метод, основанный на обработке экспериментально определенных изотерм сорбции-десорбции, считается наиболее рациональным [117]. В результате расчетов получают характеристики пористого материала, которые характеризуют диффузионное сопротивление протеканию процесса массопередачи [117]. Для расчета эффективных радиусов пор используют уравнение Томсона-Кельвина, которое позволяет рассчитать максимальный радиус капилляров в материале, в которых происходит капиллярная конденсация паров [117]:

$$r_{max} = \frac{2\sigma V_{mol} \cos\Theta}{\left[RT \ln\left(\frac{1}{\varphi}\right)\right]}, \quad (3.1)$$

где $V_{mol} = M/\rho_{ж}$ – молярный объем жидкости, $м^3/моль$; σ – поверхностное натяжение жидкости, парообразная фаза которой сорбируется при температуре T , $Дж/м^2$; Θ – краевой угол смачивания; φ – относительное давление водяных паров

(относительная влажность воздуха); T – температура, при которой реализуется процесс, K ; R – универсальная газовая постоянная, $Дж/моль \cdot K$.

Характеристики волокон различного происхождения представлены в таблице 2.1, а сорбционные свойства волокон в таблице 1.6. На рисунке 2.4 представлена опытная изотерма сорбции паров воды хлопковым волокном при $t = 22,5^{\circ}C$, а также результаты ее аппроксимации с помощью различных уравнений [119, 123]. Анализ изотерм показывает, что максимальная сорбционная влажность U_p сурового хлопкового волокна составляет 25,5%, а мерсеризованного – 29%.

Анализ сорбционно-структурных характеристик исследуемых тканей показывает, что ткани из натуральных, в том числе хлопковых волокон имеют большой объем тонких пор [11, 12, 15, 123, 125], обладая высокой сорбционной емкостью.

В таблице 3.2 приводятся результаты экспериментального исследования сорбционных свойств бязи, полученные на вакуумной сорбционной установке с весами Мак-Бена-Бакра при $20^{\circ}C$ на кафедре «Процессы и аппараты химической технологии» МГТУ имени А.Н. Косыгина (ныне РГУ имени А.Н. Косыгина), а на рисунке 3.1 приведены изотермы сорбции паров воды хлопковым волокном и тканью бязь.

Таблица 3.2 – Сорбционные свойства хлопчатобумажной ткани (бязь)

φ, %	Вид обработки			
	Суровая ткань, U_p , %	Расшлихтованная ткань U_p , %	Отваренная ткань U_p , %	Отбеленная ткань, U_p , %
12,0	2,13	2,10	2,38	2,48
26,0	3,34	3,33	3,69	3,84
40,0	4,34	4,39	4,70	4,88
51,0	5,39	5,52	5,83	5,99
66,0	6,81	6,89	7,25	7,57
77,0	8,63	8,73	9,03	9,70
95,0	13,74	14,16	13,88	17,36

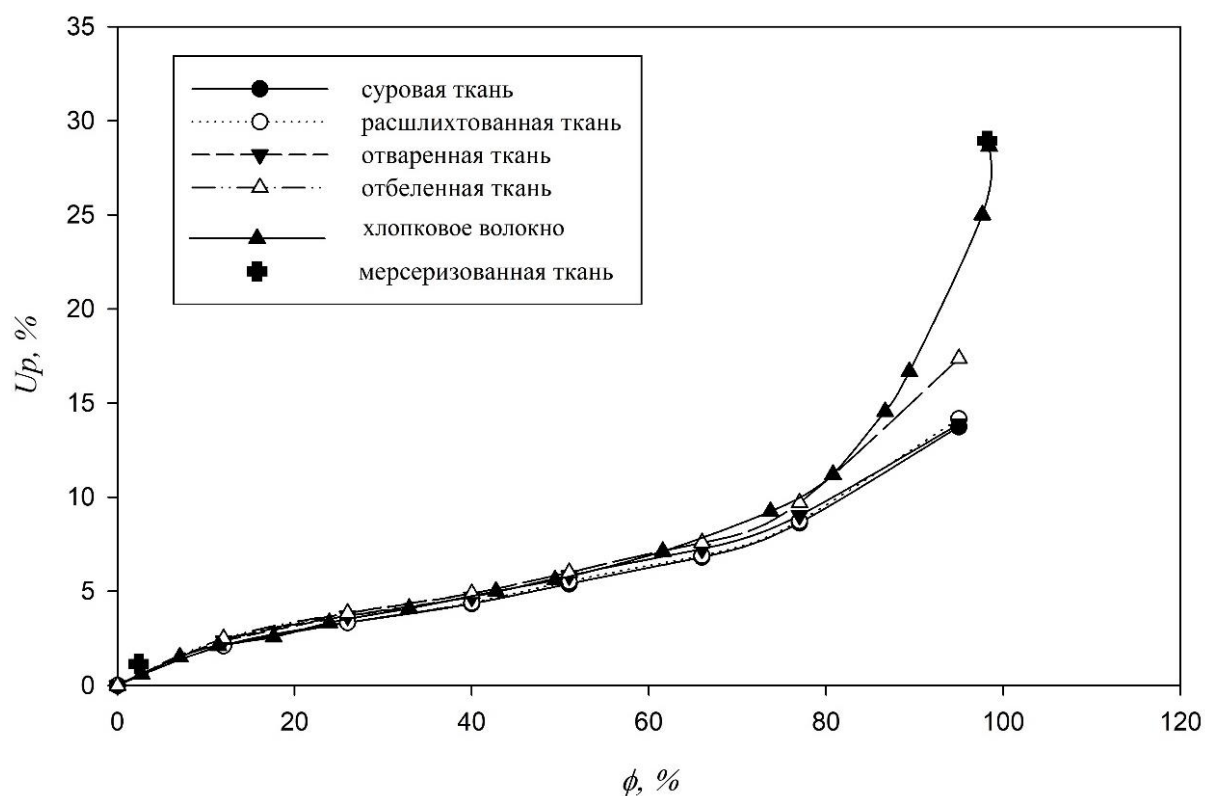
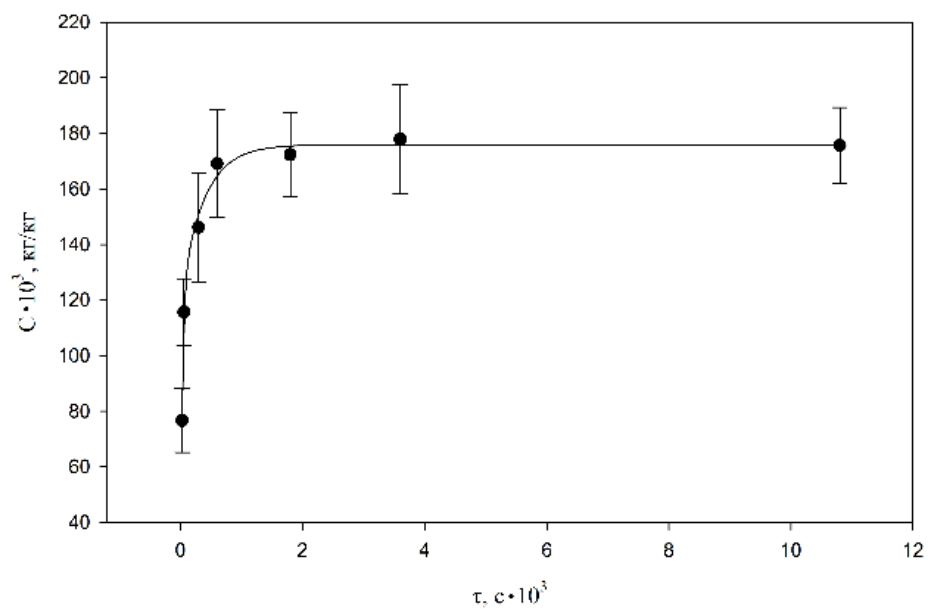


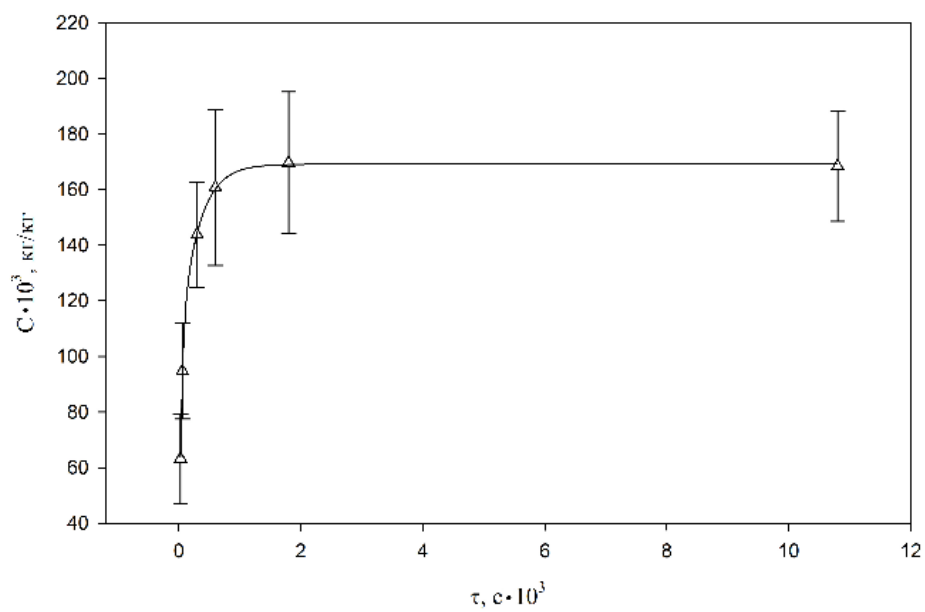
Рисунок 3.1 - Изотермы сорбции паров воды хлопчатобумажной тканью (бязь) и хлопковым волокном

Анализ данных, приведенных в таблице 3.2 и на рисунке 3.1, показывает, что процессы термовлажностной обработки в химической технологии отделки оказывают влияние на сорбционные свойства хлопчатобумажной ткани, при этом определяющее значение имеют сорбционные свойства исходного хлопкового волокна.

Для типовых хлопчатобумажных тканей из наиболее востребованных групп, в том числе для легкой ткани, проведено изучение равновесия в системе хлопчатобумажная ткань и гидроксид натрия [126, 127]. Как видно из рисунка 3.2, время установления равновесия в системе составляет для суровых тканей 60-180 минут. Кривые кинетики десорбции гидроксида из мерсеризованных тканей разных групп приведены на рисунке 3.3.

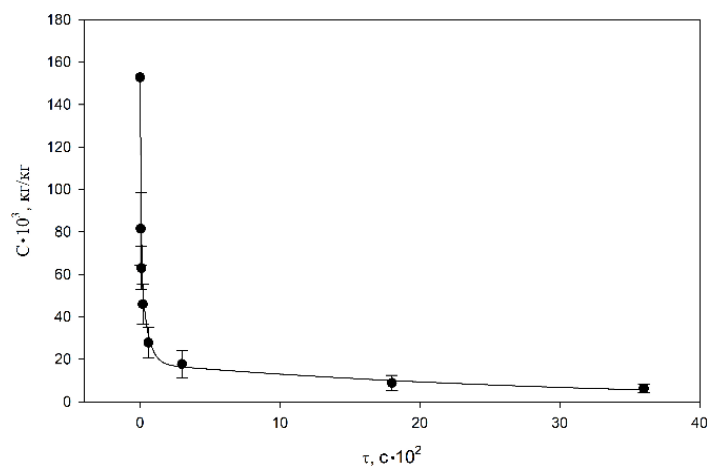


а)

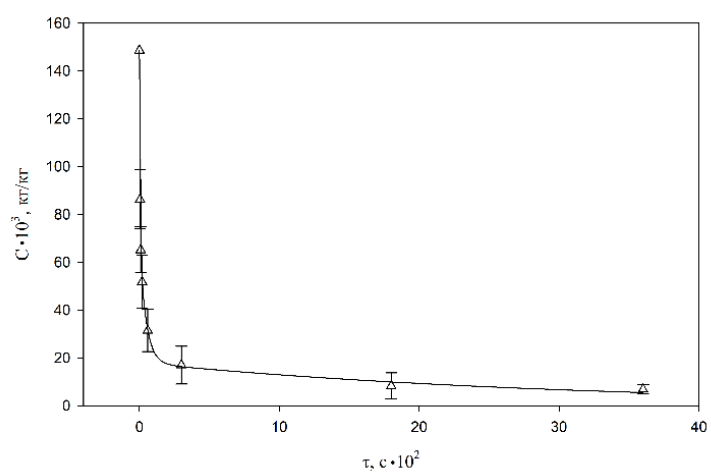


б)

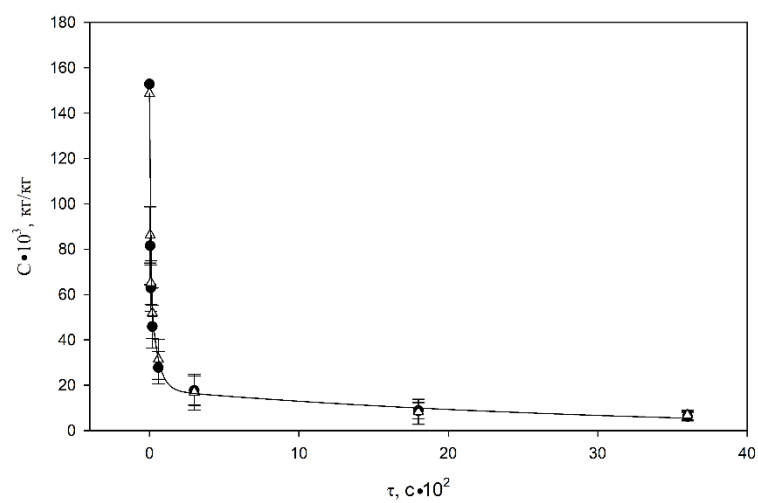
Рисунок 3.2 - Кинетика сорбции гидроксида натрия из легкой ткани (а, ●) и ткани средней плотности (б, Δ)



а)



б)



в)

Рисунок 3.3 - Кинетика десорбции гидроксида натрия из легкой ткани (а, ●), ткани средней плотности (б, Δ), легкой ткани и ткани средней плотности (в, ●, Δ)

В результате экспериментальных исследований равновесия при сорбции и десорбции хлопчатобумажных тканей из наиболее востребованных групп для каждой контрольной точки получена выборка из трех значений концентрации гидроксида натрия в ткани. Для проверки однородности полученных результатов (отсутствие грубых погрешностей) использовали критерий Смирнова-Грabbса (v -критерий), который определяли по выражению:

$$v = \frac{\bar{c} - c_{\min(\max)}}{S_c \sqrt{(n-1)/n}} \quad (3.2)$$

где: $\bar{c}$ - среднее значение выборки;

$c_{\min(\max)}$ - наименьший (наибольший) результат измерения;

n – количество опытов;

S_c - среднеквадратичная погрешность отдельного измерения:

$$S_c = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{c} - c_i)^2}{n-1}} \quad (3.3)$$

Критическое значение v -критерия при числе параллельных наблюдений $n = 3$ и уровне значимости $p = 0,05$, $v = 1,41$ [128]. Для каждой выборки выполняется соотношение:

$$v < v_{\text{кр}}, \quad (3.4)$$

следовательно, результаты исследований не содержат грубых ошибок.

Для определения доверительных интервалов изменения концентрации гидроксида натрия в тканях, для каждой выборки рассчитывали величину абсолютной погрешности результатов измерений $\Delta \bar{c}$:

$$\Delta \bar{c} = t_p(n) \cdot \frac{S_c}{\sqrt{n}}, \quad (3.5)$$

где: $t_p(n)$ - критерий Стьюдента.

При выбранном значении $p = 0,05$ и $n = 3$ величина коэффициента Стьюдента равна $t_{0,05}(3) = 4,3$.

Значение доверительного интервала для каждой контрольной точки определяется по выражению:

$$u = \bar{c} \mp \Delta \bar{c}. \quad (3.6)$$

Статистическая обработка результатов экспериментальных исследований равновесия позволяет получить количественные соотношения равновесной концентрации едкого натра в ткани (суровой и мерсеризованной) и в технологическом растворе.

3.2 Описание лабораторной установки и методик экспериментального исследования по изучению кинетики процесса промывки

Количественная оценка влияния на эффективность процесса основных интенсифицирующего воздействия, получение уравнений для расчётов невозможны без экспериментального исследования кинетики промывки.

Описание экспериментальных исследований кинетики промывки хлопчатобумажной ткани после ее мерсеризации

Объектом исследования в работе являлась хлопчатобумажная ткань бязь с поверхностной плотностью $M = 0,150 \text{ кг/м}^2$ и толщиной $2R = 0,00053 \text{ м}$. Модуль промывной ванны равен 300.

Серия опытов повторялась не менее трёх раз с одинаковым модулем промывной ванны. Все образцы имели одинаковую массу (масса сухого образца ткани составляла 3 г). Для аналогичных образцов и условий эксперимента проводились опыты по промывке без интенсификатора.

Экспериментальные исследования проводились в лабораториях физики Пятигорского медико-фармацевтического института – филиал ГБОУ ВПО ВолгГМУ и в лабораториях ОХТ и ПАХТ кафедры энергоресурсоэффективных технологий, промышленной экологии и безопасности РГУ имени А.Н. Косыгина.

Для инициирования электрического разряда в водных промывных растворах, обладающих достаточно высокой проводимостью, использовался импульс высокого напряжения с коротким фронтом и ограниченной длительностью. Разработанный и изготовленный в Пятигорском медико-фармацевтическом институте высоковольтный генератор позволял получать

импульс напряжения амплитудой до 50 кВ с фронтом $t_f = 0,1$ мкс и длительностью импульса $t_n = 0,8$ мкс.

Промывная ванна цилиндрической формы объемом 1 л изготовлена из полиэтилена низкого давления. Электроды встроены в крышку и дно ванны. Исследуемый образец ткани размещался вокруг электродов в ванне, заполненной водой. При проведении опытов варьировались величины межэлектродного промежутка, амплитуда импульса напряжения, частота разрядов, их количество, а также время обработки. Расстояние от образца ткани до канала разряда, формирующего кавитацию и пульсирующую ударную волну, было неизменным. Промывка хлопчатобумажной ткани в опытах осуществлялась от гидроксида натрия после мерсеризации.

Схема лабораторной установки представлена на рисунке 3.4.

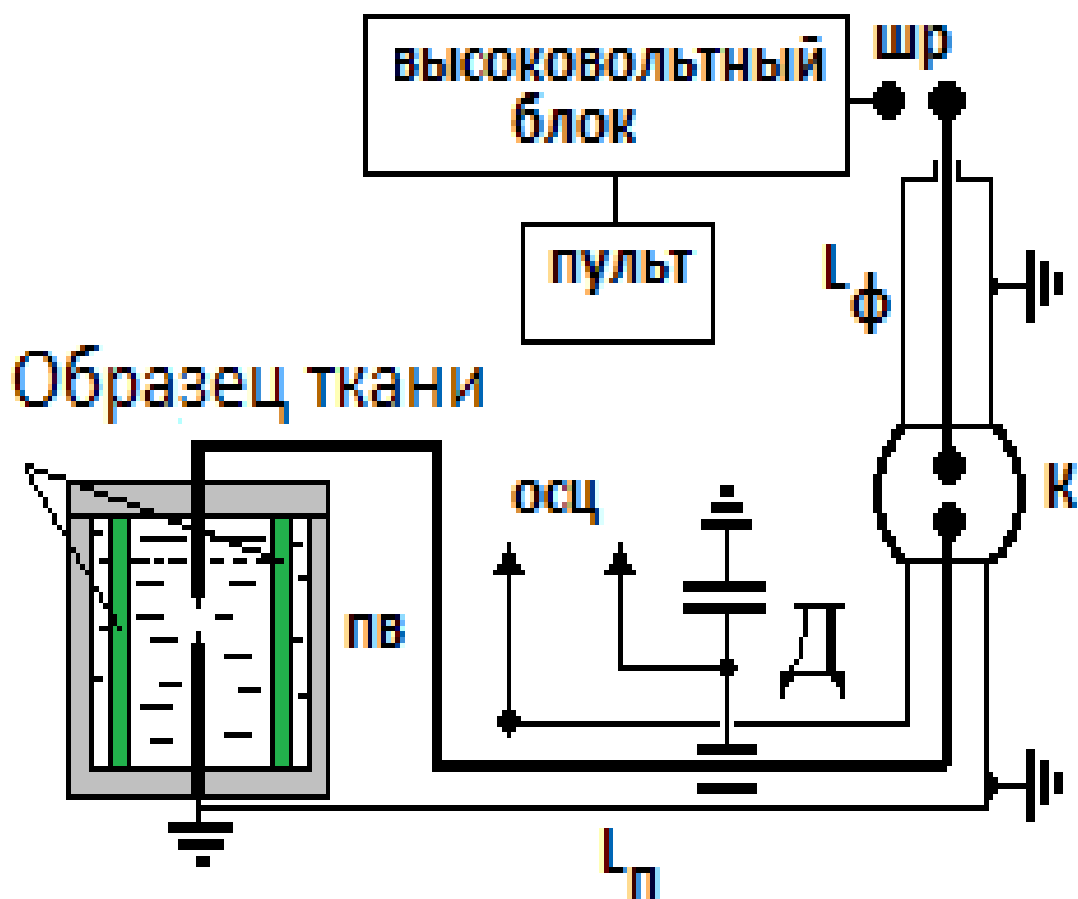


Рисунок 3.4 - Схема экспериментальной лабораторной установки:

ПВ – промывная ванна; ШР – шаровой разрядник; L_ф – формирующая линия; L – передающая линия; К – коммутатор; Д – делитель напряжения.

Описание эксперимента

Раствор гидроксида натрия готовили из сухой щелочи (100 г сухого гидроксида натрия на литр дистиллированной воды). Точную концентрацию раствора устанавливали с помощью титрования его серной кислотой известной концентрации (раствор серной кислоты приготовлен из стандарт-титра).

Образцы ткани, имеющие строго определенную массу (необходимо для обеспечения выбранного модуля промывной ванны), замачивают в приготовленном ранее растворе гидроксида натрия на определённый промежуток времени (60 минут для ткани с плотностью 150 г/м²). Образцы в течение этого времени перемешивались стеклянной палочкой для того, чтобы обеспечить равномерную пропитку щелочью.

По истечении времени замачивания образцы отжимались до стопроцентного отжима (масса раствора гидроксида натрия, оставшегося на ткани, была равной массе сухого образца).

Промывка образцов ткани осуществлялась в течение равных промежутков времени (точки, необходимые для построения кривой кинетики процесса экстрагирования). Для сравнения эффективности электроразрядного экстрагирования гидроксида натрия из образцов ткани, аналогичные образцы ткани были промыты без интенсификатора.

В ходе экспериментальных исследований концентрация гидроксида натрия после процесса экстрагирования его из образцов хлопчатобумажной ткани определялась посредством обратного титрования. В качестве вспомогательного раствора использовалась серная кислота, добавленная в анализируемый раствор в заведомо избыточном известном количестве. Непрореагировавший избыток серной кислоты оттитровывался раствором гидроксида натрия известной концентрации. Концентрация гидроксида натрия в ткани после процесса промывки определялась по формуле (3.7):

$$C_{NaOH} = \frac{(V_{H_2SO_4} \cdot N_{H_2SO_4}) - (V_{NaOH} \cdot N_{NaOH}) \cdot 40}{m_{TK} \cdot 1000} \quad (3.7)$$

где: C_{NaOH} – концентрация гидроксида натрия в ткани, кг/кг; $V_{H_2SO_4}$ – объем серной кислоты, пошедшей на титрование, мл; $N_{H_2SO_4}$ – нормальная концентрация серной кислоты, Н; V_{NaOH} – объем гидроксида натрия, используемого при титровании, мл; N_{NaOH} – нормальная концентрация гидроксида натрия, Н; $m_{тк}$ – масса сухого образца ткани, кг.

Методы аналитического анализа. Титрование. Обратное титрование

Для определения количества технологического загрязнения в ткани использовался метод обратного титрования.

Титрование – один из методов количественного анализа. Сущность титрования состоит в прибавлении к анализируемому раствору определенного реактива (титрант), вступающего в химическое взаимодействие с определяемым веществом, находящимся в анализируемом растворе. Концентрация добавляемого в раствор вещества должна быть точно известна. Так как вещества реагируют друг с другом в эквивалентных соотношениях, концентрацию определяемого вещества можно определить по закону эквивалентов. В ходе титрования наступает момент, когда количество добавленного в раствор титранта эквивалентно количеству определяемого вещества. Такой момент называется точкой эквивалентности.

Различают прямое титрование, обратное и титрование методом замещения. При прямом титровании к раствору, содержащему анализируемое вещество, непосредственно добавляют раствор титранта. В случае обратного титрования к анализируемому раствору сначала добавляют избыток определенного реагента в известном количестве, а затем оттитровывают его остаток, который не вступил в реакцию. При титровании методом замещения к раствору, содержащему определяемое вещество, добавляют избыток определенного реагента и затем титруют один из продуктов реакции между определяемым веществом и добавленным реагентом [129].

В ходе обратного титрования осуществляется реакция (3.8):



К определяемому раствору А прибавляется раствор В в избытке, а затем это избыток оттитровывается раствором D по реакции (3.9):



В точке эквивалентности образуется равновесная система (3.10):



Результаты экспериментальных исследований

Средние значения концентрации оставшегося в ткани гидроксида натрия после промывки в различные промежутки времени, т.е. кинетика процесса, представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 - Концентрация гидроксида натрия в ткани после промывки без интенсификатора и с использованием в качестве интенсификатора импульсного электрического поля (ИЭП)

Время, τ , с	Средняя концентрация щелочи в ткани, без интенсификатора, $\bar{c} \cdot 10^3$ кг/кг	Средняя концентрация щелочи в ткани, с ИЭП, $\bar{c} \cdot 10^3$ кг/кг
0	128,4	128,4
10	80,7	50,3
20	69,2	38,2
30	59	36,2
60	46,2	32
120	37,7	29
180	35,8	29
240	26,3	24,5
300	26,3	19,2

Результаты экспериментального исследования представлены в виде кривых кинетики процесса промывки (рисунок 3.5). На данном рисунке приведены результаты аппроксимации полученных экспериментальных кривых двумя методами.

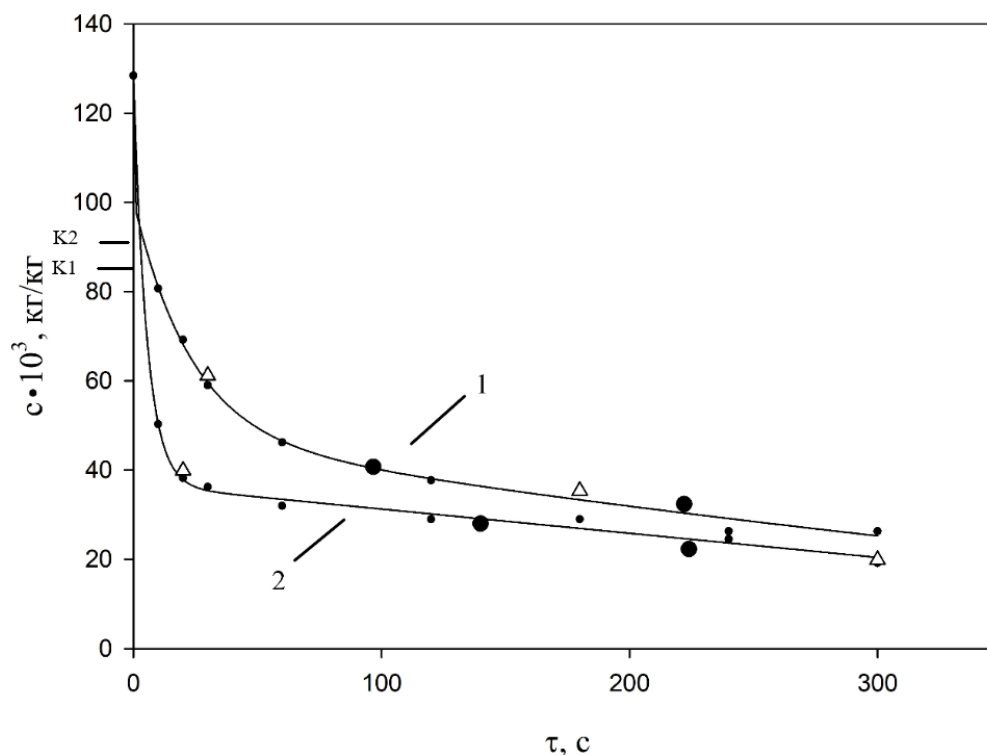


Рисунок 3.5 - Кривые кинетики промывки без интенсификатора (1) и с использованием ИЭП (2). Δ - аппроксимация методом наименьших квадратов для второго периода промывки по уравнению: $c = e^{-0,00248 \cdot \tau + 3,74}$; $\bullet$ - расчёт зональным методом

Выражение $c = e^{-0,00248 \cdot \tau + 3,74}$ получено из анализа экспериментальных кривых $c = f(\tau)$, который позволяет предположить функциональную зависимость экспоненциального вида: $C = e^{a\tau + b}$. Параметры a и b находятся по методу наименьших квадратов (МНК). МНК применим к линейной зависимости, в данном случае имеет место нелинейная зависимость. Поэтому зависимость приводится к линейному виду в результате логарифмирования. Для нахождения параметров a и b решали систему уравнений:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \ln C_i \cdot \tau_i - a \sum_{i=1}^n \tau_i^2 - b \sum_{i=1}^n \tau_i = 0 \\ \sum_{i=1}^n \ln C_i - a \sum_{i=1}^n \tau_i - b \cdot n = 0 \end{cases} \quad (3.11)$$

где n – число опытов в эксперименте. В результате решения системы уравнений получены значения параметров $a = -0,00248$ и $b = 3,74$.

Расчет зональным методом проводили, основываясь на решении уравнения нестационарной массопроводности:

$$k_i = \frac{R^2 \ln \frac{c_H}{c_K}}{\mu_1^2 \tau_i} \quad (3.12)$$

где: R – половина толщины ткани; c_H и c_K – начальная и конечная концентрация загрязнения в ткани соответственно; μ – первый корень характеристического уравнения μ , который для бесконечной пластины равен $\pi/2$.

На графике приведены значения средних концентраций в соответствующих концентрационных зонах.

Как видно из рисунка 3.5, сокращение длительности процесса до достижения одинакового значения концентрации щёлочи в ткани составило 33,3%. При промывке гидроксида натрия из хлопчатобумажных тканей не использовали поверхностно-активных веществ, чтобы исключить их интенсифицирующее воздействие на процесс.

Кинетику процесса промывки принято делить на два периода. В первом периоде происходит механическое замещение первоначального пропиточного раствора в ткани на промывной раствор, а во втором – снижение общей концентрации загрязнения в ткани от ее критического значения до заданной по условиям технологии конечной концентрации загрязнения в результате внутреннего массообмена и постепенного вымывания пропиточного раствора [1].

На полученных экспериментально кривых кинетики промывки, представленных на рисунке 3.5, наблюдаются два периода процесса, при этом воздействие импульсного электрического поля, как нами и ожидалось, вызывает интенсификацию процесса как в первом периоде, так и во втором периодах. Влияние импульсного электрического поля на кинетику процесса в литературных источниках объясняется снижением поверхностного натяжения жидкой фазы, возможным повышением температуры, уменьшением диффузионного пограничного слоя и др.

Распределяемый компонент может находиться в текстильном материале в свободном или связанном состоянии. Если для удаления загрязнения,

находящегося в свободном состоянии достаточно градиента концентраций, то для удаления связанного компонента необходимо помимо градиента концентраций подвести определенное количество энергии для разрыва связи между распределяемым компонентом и текстильным материалом [1]. В процессе промывки невозможно обеспечить полное удаление распределяемого компонента из текстильного материала в сплошную фазу, поскольку процесс массообмена будет продолжаться только до достижения равновесия между обеими фазами.

Диффузия распределяемого компонента во внутрипоровом пространстве текстильного материала имеет сложный характер и зависит от множества факторов. При промывке происходит изменение характера распределения пор по размерам из-за набухания материала, а также вместе с поверхностной адсорбцией и десорбцией распределяемого компонента может происходить его абсорбция объемом волокна. Учитывая сложность диффузионных процессов при промывке текстильных материалов, термин «диффузия» заменяют на «массопроводность», при этом коэффициент массопроводности имеет более общий смысл и учитывает больше факторов, влияющих на процесс [1].

При промывке текстильных материалов преобладает, в основном, физико-механическая форма связи распределяемого компонента с материалом [1, 10].

В таблице 3.4 представлены результаты расчетов степени промывки х/б ткани от гидроксида натрия без и с интенсификацией импульсным электрическим полем (ИЭП).

Степень промывки рассчитывалась по формуле 3.13:

$$\eta = \frac{(c_0 - c_i)}{c_0} \cdot 100, \% \quad (3.13)$$

где: c_0 – начальная концентрация гидроксида натрия в ткани;

c_i – текущая концентрация гидроксида натрия в ткани.

Таблица 3.4 – Изменение степени промывки хлопчатобумажной ткани

Время, с	Степень промывки η , % с ИЭП	Степень промывки η , % без интенсификации
0	0	0
11	61	34
20	70	45
30	72	54
178	77	72
230	80	77
300	84	78

На рисунке 3.6 представлена зависимость степени промывки х/б ткани от гидроксида натрия без использования интенсификатора (нижняя кривая) и с использованием в качестве интенсификатора импульсного электрического поля высокой напряженности (верхняя кривая).

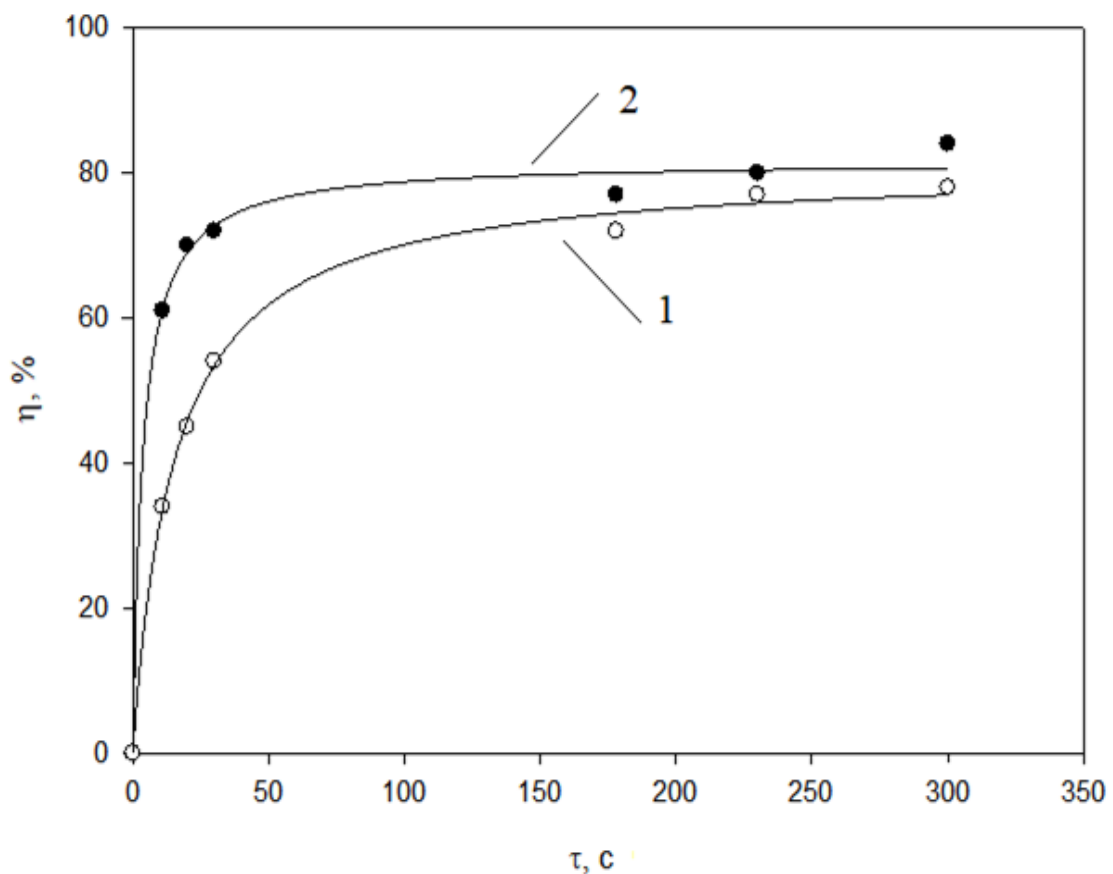


Рисунок 3.6 - Кривые изменения степени промывки без интенсификатора (1) и с использованием ИЭП (2)

Определение основных прочностных характеристик объекта исследования

В испытательной лаборатории кафедры материаловедения и товарной экспертизы РГУ им. А.Н. Косыгина были произведены исследования некоторых характеристик изученной ткани для оценки влияния выбранного интенсифицирующего воздействия на качественные показатели промываемой ткани.

Прочность – это способность ткани сопротивляться разрыву. Её определяют как по основе, так и по утку при разрыве полосок ткани шириной 5 см и длиной 20 см на специальном приборе – разрывной машине [2].

Определение характеристик механических свойств текстильных полотен при растяжении их до разрыва проводится на разрывной машине, с помощью которой можно определить разрывную нагрузку и разрывное удлинение.

Были проведены исследования нижеперечисленных характеристик тканей.

Разрывная нагрузка (P_r , Н, кгс) – максимальное усилие, которое может выдержать пробная полоска ткани до разрыва.

Разрывное удлинение (ϵ_r) - приращение длины образца текстильного материала к моменту разрыва (мм).

Испытания по исследованию разрывных характеристик текстильных материалов проводятся по ГОСТ 3813-72 Материалы текстильные. Ткани и штучные изделия. Методы определения разрывных характеристик при растяжении [130]. В производственной практике и в научных исследованиях широко применяются разрывные характеристики механических свойств волокон, нитей и текстильных полотен, получаемые при однократном растяжении образца до разрыва. Для получения таких характеристик используют разрывные машины (динамометры). Методика работы с разрывной машиной описана в лабораторном практикуме коллектива авторов кафедры текстильного материаловедения РГУ им. А.Н. Косыгина [130, 131].

Определение толщины образцов х/б ткани производилось с помощью микрометра. Толщина определялась как среднее значение пяти измерений в различных местах образца. Результаты измерений представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 - Толщина образца ткани

Тип ткани	Толщина, мм
Бязь	0,45

Результаты проведённых испытаний, приведённые в таблице 3.6, показывают, что все показатели соответствуют требованиям ГОСТ 29298-2005 «Ткани хлопчатобумажные и смешанные бытовые. Общие технические условия (с Поправкой)» [5]. Проведено сравнение экспериментальных значений разрывных нагрузок по основе и по утку соответственно для тканей хлопчатобумажных бельевой группы с поверхностной плотностью от 110 до 150 г/м² включительно. Для определения разрывной нагрузки были испытаны три образца по основе и три образца по утку размерами 200 мм на 50 мм (рабочая длина согласно ГОСТ 3813—72)[130].

Таблица 3.6 - Характеристики механических свойств исходной и промытой с ИЭП хлопчатобумажной ткани при растяжении до разрыва

Ткань	Характеристика				Разрывная нагрузка (не менее) согласно ГОСТ, кгс
	Разрывная нагрузка, кгс		Разрывное удлинение, мм		
	До воздействия ИЭП	После воздействия ИЭП	До воздействия ИЭП	После воздействия ИЭП	
Бязь, по основе	40,8	36,6	15	13	30
Бязь, по утку	38,1	32,5	18	18	20

Как видно из таблицы 3.6, разрывная нагрузка после воздействия ИЭП уменьшилась: по основе на 10,3%, по утку на 14,7% и остается в пределах нормы.

Таким образом, прочностные характеристики образцов хлопчатобумажных тканей после процесса экстрагирования с использованием электрического импульсного поля высокой напряженности в качестве интенсификатора отвечают требованиям государственных стандартов.

Анализ особенностей воздействия ИЭП на промывную жидкость

Анализ особенностей воздействия ИЭП на промывную жидкость показал, что температура воды под действием импульсного электрического поля повышается с течением времени, а поверхностное натяжение снижается. Как видно

из рисунка 3.7 и таблицы 3.7, в течение 200 с температура повышается на 3 °С, а поверхностное натяжение за это время снижается на $8 \cdot 10^{-3}$, Н/м [53, 132–135].

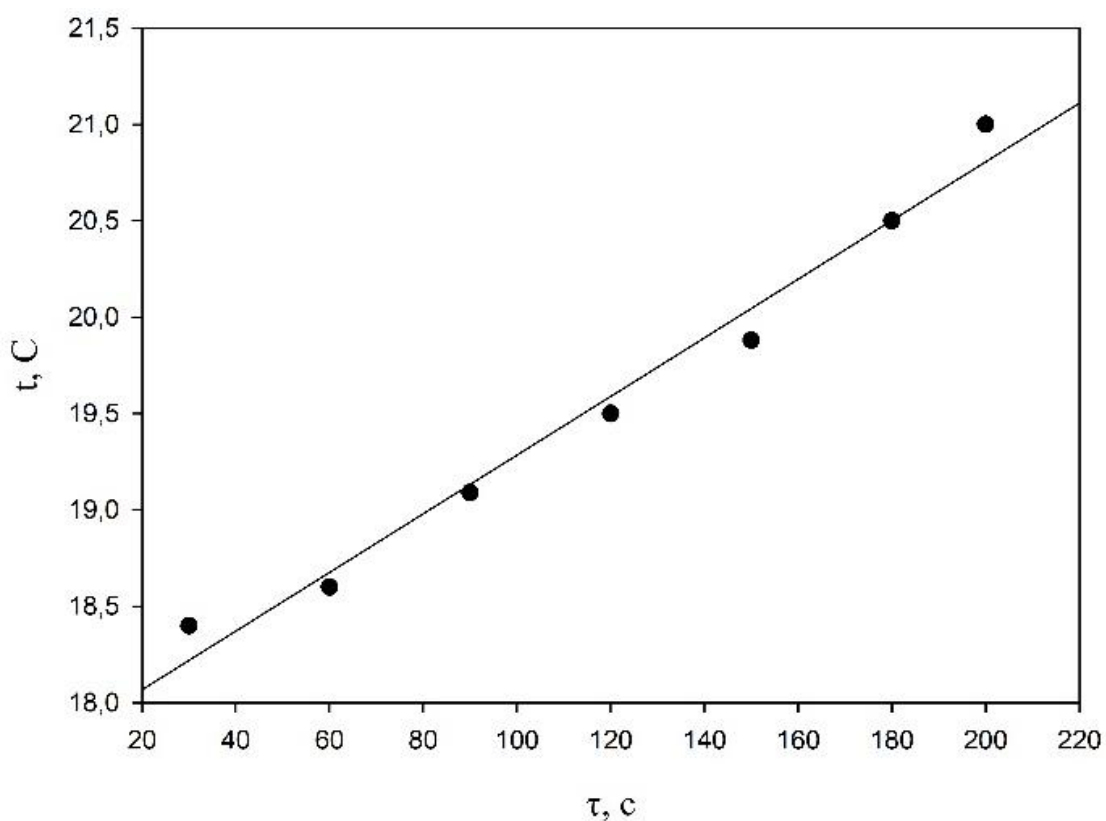


Рисунок 3.7 – Зависимость температуры воды от времени экстрагирования

Таблица 3.7 – Влияние обработки импульсным электрическим полем (ИЭП) на параметры воды

Вода	Параметр	
	Температура t , °C	Поверхностное натяжение $\sigma_{\text{ср}} \cdot 10^{-3}$, Н/м
Вода без обработки	18	73
Вода после обработки ИЭП	21	65

Измерения коэффициента поверхностного натяжения осуществляли сталагмометром. Определение поверхностного натяжения с помощью сталагмометрического метода состоит в измерении объема или массы капли жидкости, которая медленно отделяется от кончика капилляра в нижней части сталагмометрической трубки. Метод основан на принципе, что в момент отделения сила тяжести капли уравнивается силами поверхностного натяжения. Эти

силы действуют вдоль окружности шейки капли и предотвращают её отделение. При учёте всех поправок погрешность сталагмометрического метода не превышает 1% [136]. Метод используется для измерения полустатического поверхностного натяжения при продолжительности образования капли 2–10 с.

Результаты исследований говорят о том, что воздействие ИЭП изменяет поверхностное натяжение воды, что происходит, вероятно, из-за разрыва водородных связей. Снижение поверхностного натяжения воды улучшает смачиваемость и облегчает диффузию извлекаемых веществ из обрабатываемого объекта в промывной раствор [53, 132, 133, 137].

При обработке ИЭП на полярные молекулы воды действуют силы, которые стремятся повернуть молекулы в соответствии с изменением направления поля, и в результате трения молекул в относительно вязкой жидкости при их движении выделяется теплота [53, 133].

В работе [52] оценивалось время начала и конца кавитационных процессов при воздействии ИЭП, размер и количество кавитационных пузырьков в оптическом поле. На рисунке 3.8 представлены фоторазвёртки развития кавитации [52]. Изображение получено при использовании скоростных кинокамер СКС-1М и СФР-2М. В работе использовалась формирующая линия с энергией в импульсе 200 Дж, разрядная емкость составила 0,01 мкФ. Рассматриваемое оптическое поле размером 150 мм² отстояло от оси расположения электродов на 10 мм.

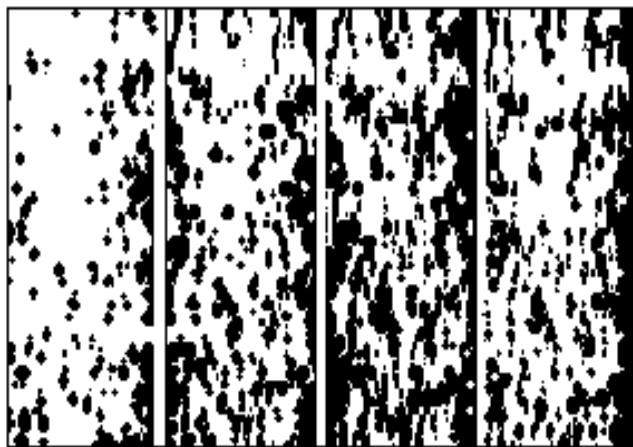


Рисунок 3.8 – Фоторазвертка кавитационных процессов при воздействии прямоугольного импульса

Механизм интенсифицирующего воздействия импульсного электрического поля

Исследования, посвященные технологиям, основанным на импульсных электрических разрядах в воде, показывают, что вода в данном случае является средой как для генерации и воспроизводства электрических разрядов, так и для переноса энергии электрических разрядов к объекту обработки. В случае использования ИЭП с целью очистки волоконных материалов от различных загрязнений, вода не только окружает волокно, но также проникает внутрь волокна, принося новые зародыши кавитации [138], и выносит удаляемые компоненты в общую рабочую среду. Исследователи считают, что одним из главнейших эффектов в интенсификации процессов удаления загрязнений из волокнистого материала с помощью, в т.ч., электрических полей, является электроразрядная кавитация, возбуждаемая внутри волокна разрядом [138], а для эффективной очистки волокон необходимо быстрое замещение удаленных веществ в капиллярах и межволоконных каналах новыми объемами воды, что способствует кавитации. В этой связи одним из ключевых факторов процесса является интенсивность водопоглощения как отдельными волокнами, так и всей системой волокон в целом. В [138] экспериментально показано, что интенсивность водопоглощения (на примере льняного волокна) достаточно высока на начальном этапе электроразрядной обработки, то есть под действием обработки воды электрическим полем изменяются некоторые физико-химические показатели обрабатываемой воды, что оказывает влияние на интенсивность водопоглощения волокна.

В [83] установлено, что под действием высоковольтных импульсных электрических разрядов улучшаются капиллярные и влагообменные свойства хлопчатобумажной ткани и возрастает степень удаления воскообразных веществ. В исследовании сравнивали холодное беление и воздействие высоковольтных импульсных электрических разрядов, в результате было экспериментально показано существенное увеличение капиллярности суровой хлопчатобумажной ткани (до 72 мм/ч) под воздействием электрических разрядов, увеличение объема макропор и удельной поверхности. Это позволяет предложить, что интенсифицирующее воздействие

электрических импульсов связано не только с изменением показателей промывного раствора, но и структуры самой ткани.

Изменение надмолекулярной и поровой структуры шерстяного волокна под воздействием обработки электрическими разрядами отмечают в [139]. Эффект связывают с действием электрогидравлических ударов, вызванных импульсно возникающим высоким давлением из-за схлопывания кавитационных полостей, а также продуктов расщепления воды, образующихся в рабочей среде под действием кавитации [139, 140].

3.3. Оценка эффективности воздействия ИЭП на кинетику процесса промывки хлопчатобумажных тканей

То, что воздействие ИЭП вызывает интенсификацию процесса промывки как в первом периоде, так и во втором, должно найти отражение в значениях кинетических коэффициентов массоотдачи и массопроводности, необходимых для количественной оценки интенсификации. Обработкой кривых кинетики промывки были найдены значения кинетических коэффициентов [141, 142].

В [28] разработан модифицированный метод определения коэффициента массоотдачи β_c и зависимости коэффициента массопроводности $k = f(\bar{c})$ из кинетической кривой процесса, содержащей оба периода, не требующий в последнем случае исключения внешнего диффузионного сопротивления. Здесь k - коэффициент массопроводности, $\text{м}^2/\text{с}$, $\bar{c}$ - среднеобъемное массосодержание материала, $(\text{кг распределяемого вещества})/(\text{кг твердой фазы})$. Расчёт кинетических коэффициентов проводился с использованием данного метода. Сначала определяли коэффициент массоотдачи, затем находилась зависимость $k = f(\bar{c})$ [28]. По этой методике были обработаны кривые кинетики промывки, приведенные на рисунке 3.5.

Как отмечено выше, на кривых кинетики промывки без интенсификации и с интенсификацией ИЭП наблюдаются два периода процесса.

Из линейного участка кривых кинетики, на котором процесс контролируется внешней диффузией и, следовательно, подчиняется уравнению массоотдачи

(критическое массосодержание $\bar{c}_{кр}$ согласно рисунку принято равным 0,08838 и 0,0838 кг/кг сухого материала - соответственно без воздействия ИЭП и с таковым, - были найдены приведённые в таблице 3.8 (коэффициенты массоотдачи при промывке без интенсификации и с воздействием ИЭП) истинные коэффициенты массоотдачи β_c , м/с [29] из уравнения массоотдачи:

$$i = \beta_c (C_{c.п} - C_c), \quad (3.14)$$

где: i - плотность потока распределяемого вещества, кг/(м²·с); $C_{c.п}$, C_c - концентрация распределяемого вещества у поверхности раздела фаз и в ядре внешней фазы (среды) соответственно, кг/м³; β_c - коэффициент массоотдачи, м/с.

Таблица 3.8 – Коэффициенты массоотдачи

Промывка	Без ИЭП	С ИЭП
β_c , м/с	$1,377 \cdot 10^{-5}$	$2,55 \cdot 10^{-5}$

Экспериментальное исследование показало, что наложение импульсного электрического поля высокой напряженности увеличивает коэффициент массоотдачи в данном случае в 1,85 раза.

Основной проблемой при кинетических расчетах является отсутствие данных по кинетическому коэффициенту массопроводности из-за сложности его экспериментального определения [1, 26, 29, 114].

Для определения зависимости $k = f(c)$ зональным методом используется решение дифференциального уравнения массопроводности для тела соответствующей формы, считая $\bar{c}_н, \bar{c}_к, k, \beta_c^*, \bar{c}_p, R = const$, ($\bar{c}_н, \bar{c}_к$ – начальное и конечное массосодержания на опытной кривой кинетики, кг/кг; $\bar{c}_p$ – равновесное массосодержание, кг/кг; R – определяющий размер (половина толщины ткани), м), приняв за начало отсчета времени критическую точку и поместив начало координат в центр тела [29, 114]:

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = k \Delta c, 0 < x < R, \tau > 0, \quad (3.15)$$

где Δ – оператор Лапласа.

Решение задачи (3.15) для среднеобъемного массосодержания в теле в регулярном режиме массообмена будет иметь вид [29, 114]:

$$\bar{E} = B_1 \exp\left(-\frac{\mu_1^2}{R^2} k \tau\right), \quad (3.16)$$

где B_1 и m_1 – предэкспоненциальные множители и корни характеристических уравнений для первого члена решений задач, зависящие от формы тела и числа Bi_m , μ – первый корень характеристического уравнения.

Для нахождения зависимости $k = f(c)$ разбиваем весь диапазон изменения массосодержания распределяемого вещества от $c_n = \bar{c}_{кр}$ до $\bar{c}_k$ (где $\bar{c}_k$ – конечное массосодержание на опытной кривой кинетики) на n интервалов (концентрационных зон), для каждого из которых находим значение коэффициента k , где он считается постоянным [29, 114].

В приведённых уравнениях $\bar{E}$ – среднее относительное массосодержание:

$$\bar{E} = (\bar{c}(\tau) - \bar{c}_p) / (c_n - \bar{c}_p), \quad (3.17)$$

R – определяющий размер (половина толщины пластины (ткани)), м; k – коэффициент массопроводности, m^2/c ; $\bar{c}_p$ – равновесное массосодержание, кг/кг; Bi_m – число Био массообменное модифицированное:

$$Bi_m = \frac{\beta_c^* R}{k \rho_0}, \quad (3.18)$$

где: β_c^* – модифицированный коэффициент массоотдачи, $кг/(m^2 \cdot c)$; ρ_0 – плотность абсолютно сухого материала, $кг/м^3$.

Коэффициенты массопроводности распределяемого компонента k для небольшого участка кинетической кривой, соответствующего второму периоду протекания процесса, рассчитывались по уравнению, полученному в результате решения уравнения нестационарной массопроводности (второй закон Фика).

$$k = \frac{R^2}{\mu^2 \Delta \tau_i} \ln \left[\frac{c_{iн} - c_p}{c_{iк} - c_p} \right], \quad (3.19)$$

где R – определяющий размер, м; μ – первый корень характеристического уравнения, являющегося решением уравнения массопроводности для тела соответствующей формы; $c_{iн}$, $c_{iк}$ – начальная и конечная концентрация распределяемого компонента на i -ом участке кинетической кривой, кг/кг; c_p – равновесная концентрация распределяемого компонента, кг/кг; $\Delta \tau_i$ –

продолжительность процесса экстрагирования на i -ом участке кинетической кривой, с.

Коэффициенты массопроводности (диффузии) k , м²/с, приведённые в таблицах 3.9 и 3.10, определяли, разбивая кривые кинетики промывки при $\bar{c} < \bar{c}_{кр}$ на интервалы, в которых значение коэффициентов считается постоянным (интервалы приведены в этих таблицах).

Таблица 3.9 - Расчет коэффициентов массопроводности k зональным методом для лёгкой хлопчатобумажной ткани при промывке с ИЭП

Номер концентрационной зоны	1	2	3
$(\bar{c}_{н.i} - \bar{c}_{к.i}) \cdot 10^3$ кг/(кг сухого материала)	0,0838-0,03062	0,03062-0,02535	0,02535-0,01925
$k_i \cdot 10^{10}$, м ² /с	4,862	0,937	0,711
Bi_m	20,4	106,0	139,5

Таблица 3.10 - Расчет коэффициентов массопроводности k зональным методом для лёгкой хлопчатобумажной ткани при промывке без воздействия ИЭП

Номер концентрационной зоны	1	2	3
$(\bar{c}_{н.i} - \bar{c}_{к.i}) \cdot 10^3$ кг/(кг сухого материала)	0,08838-0,04375	0,04375-0,03767	0,03767-0,02710
$k_i \cdot 10^{10}$, м ² /с	3,351	0,682	0,498
Bi_m	16,0	78,7	108,0

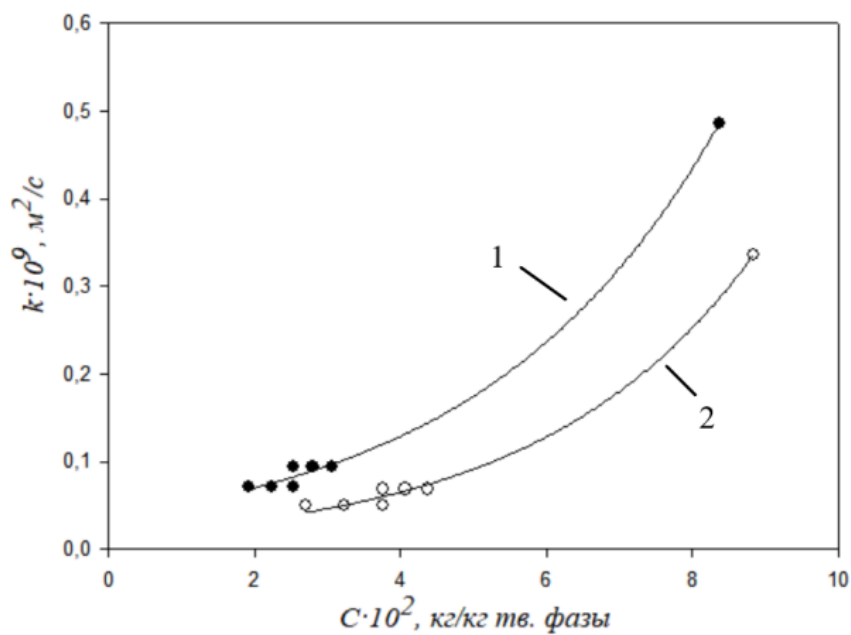
В таблице 3.11 приведены результаты сравнения коэффициентов массопроводности при промывке исследованного волокнистого материала без интенсификации и с электрическими разрядами

Таблица 3.11 – Сравнение коэффициентов массопроводности k при промывке без воздействия ИЭП и с воздействием ИЭП

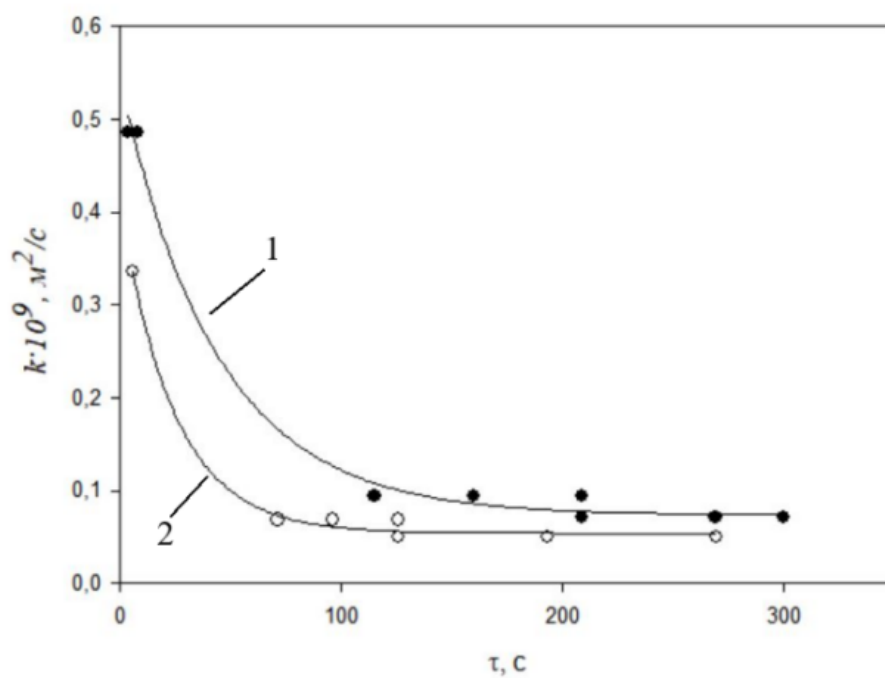
Номер концентрационной зоны		1	2	3
$k_i \cdot 10^{10}$, м ² /с	Без ИЭП	3,351	0,682	0,498
$k_i \cdot 10^{10}$, м ² /с	С ИЭП	4,862	0,937	0,711

На рисунке 3.9 показано изменение коэффициента массопроводности при экстрагировании гидроксида натрия из хлопчатобумажной ткани водой с

интенсификацией и без неё в зависимости от концентрации и времени процесса [143].



а)



б)

Рисунок 3.9 – Зависимость коэффициента массопроводности от концентрации гидроксида натрия (а) и от времени (б) при экстрагировании гидроксида натрия из хлопчатобумажной ткани водой при $t = 21^\circ\text{C}$. 1 - промывка с интенсификатором ИЭП; 2 - промывка без интенсификатора ИЭП.

Как видно из таблицы 3.10 и рисунка 3.9 коэффициенты массопроводности при промывке ткани имеют порядок 10^{-10} , что согласуется по порядку величины со

значениями этого коэффициента при экстрагировании целевых компонентов из твердой фазы. С уменьшением концентрации загрязнений он несколько снижается. Это объясняется тем, что по мере развития процесса экстрагируются вещества, более прочно связанные со структурой твердого материала [26, 29, 114]. При промывке с интенсификатором - ИЭП коэффициент массоотдачи и коэффициенты массопроводности в аналогичных концентрационных зонах больше, чем без него (примерно в 1,4 - 1,5 раза).

Возрастание всех кинетических коэффициентов указывает на то, что электрические разряды интенсифицируют не только внешний, но и внутренний массоперенос. Последнее объясняется, вероятно, тем, что кавитационные явления и турбулентные пульсации жидкости, порождаемые электрическими разрядами в жидкости, проникают внутрь макропор промываемой ткани, облегчая внутренний массоперенос. Кавитация, возникающие акустические течения, акустическое давление и др. эффекты вызывают интенсивные турбулентные потоки как во всей массе жидкости, так и вблизи границы раздела фаз, что приводит к существенному уменьшению толщины диффузионного пограничного слоя [26, 29, 114].

Величина числа Био массообменного Bi_m указывает на то, что в рассматриваемом процессе во втором периоде реализуется смешанно-диффузионный механизм массопереноса, при котором на скорость процесса влияют как внутреннее, так и внешнее диффузионные сопротивления.

Таким образом, в результате экспериментальных исследований и количественной оценки влияния ИЭП в жидкости на кинетические коэффициенты в процессе промывки легкой хлопчатобумажной ткани после мерсеризации, показано, что электрические разряды интенсифицирует массообмен как в первом, так и во втором периодах процесса промывки. Найденные значения кинетических коэффициентов могут быть использованы для анализа и кинетического расчета процесса промывки лёгких хлопчатобумажных тканей от гидроксида натрия после их мерсеризации.

Выводы по главе

Описаны объекты и методы исследования, представлены результаты экспериментального изучения процесса промывки тканей.

Дана оценка некоторым особенностям воздействия импульсного электрического поля на свойства воды и промывного раствора, в частности, что воздействие импульсного электрического поля приводит к снижению сил поверхностного натяжения воды, повышает смачиваемость, облегчает диффузию извлекаемых компонентов в экстрагент.

Изучено равновесие при сорбции и десорбции гидроксида натрия хлопчатобумажной тканью. Показано, что время установления равновесия в системе составляет для суровых тканей 60-180 минут.

На основе экспериментальных данных исследований проведена количественная оценка влияния электрических разрядов, инициируемых импульсами высокого напряжения в рабочем растворе, на кинетические коэффициенты массоотдачи и массопроводности в процессе экстрагирования щёлочи из хлопчатобумажной ткани после мерсеризации. Значения кинетических коэффициентов могут быть использованы для анализа и кинетического расчета процессов экстрагирования в химической технологии отделки волокнистых материалов. При промывке с ИЭП коэффициент массоотдачи и коэффициенты массопроводности увеличиваются в 1,85 и в 1,4 – 1,5 раза соответственно.

Установлено влияние ИЭП как в первом, так и во втором периодах массообменного процесса промывки, что соответствует смешанной задаче массообмена. Сокращение продолжительности процесса в первом периоде промывки составило 70%, а во втором – 32%.

Показано, что при воздействии импульсного электрического поля на промывной раствор происходит снижение сил поверхностного натяжения и повышение смачиваемости, что интенсифицирует диффузию извлекаемых компонентов в жидкую фазу. Коэффициент поверхностного натяжения снижается с $73 \cdot 10^{-3}$ Н/м до $65 \cdot 10^{-3}$ Н/м после обработки воды ИЭП в течение 200 с.

ГЛАВА 4. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА ПРОМЫВКИ ИЭП

4.1 Практические рекомендации по интенсификации массообменных процессов импульсным электрическим полем

Результаты работы использованы в патенте [144] «Способ и устройство для отделки хлопчатобумажных тканей различной плотности воздействием импульсных электрических разрядов».

Предлагаемое устройство для экстрагирования из текстильных материалов при воздействии импульсных электрических разрядов состоит из источника высоковольтных импульсов напряжения и промывной ванны с электродами. Промывная ванна цилиндрической формы изготовлена из полиэтилена. Электроды выполнены из пищевой нержавеющей стали и расположены в виде острие-острие. Импульсные электрические разряды подают на ткань с амплитудой напряжения до 50 кВ, с фронтом $t_f=0,1$ мкс и длительностью импульса $t_n=0,8$ мкс. Изобретение позволяет интенсифицировать процесс массоотдачи и массопроводности за счет высокой турбулентности движения и интенсивного перемешивания жидкости в промывной ванне под действием кавитации и ударных волн, инициируемых разрядом.

Устройство позволяет достигнуть технического результата изобретения: за счет высокой турбулентности движения и интенсивного перемешивания жидкости в промывной камере под действием кавитации и ударных волн, инициируемых разрядом, интенсифицировать процесс промывки легких хлопчатобумажных тканей от гидроксида натрия после их мерсеризации, т.е. повысить скорость массоотдачи и массопроводности.

Известен способ обработки водного раствора для промывки тканей, преимущественно хлопчатобумажных, с поверхностной плотностью до 150 г/м^2 , путем нагрева водного раствора и воздействия на него магнитным полем в течение всего процесса промывки [145].

Недостатком данного способа является то, что воздействие магнитного поля на водный раствор осуществляется после его нагрева, что снижает эффективность промывки. Данный способ применим для тканей малой поверхностной плотности, поскольку омагничивание водного раствора осуществляется кратковременно. Кроме того, омагниченный раствор используется в течение всего процесса промывки, а его активность со временем снижается, что в целом ограничивает эффективность процесса [145, 146].

Известно также изобретение, которое относится к текстильной промышленности и касается технологии отделочного производства шерстяных тканей, жидкостная обработка которых осуществляется в жгуте, и позволяет снизить общую продолжительность процесса жидкостной обработки широкого ассортимента шерстяных тканей при сохранении высокого качества обработки. Это достигается тем, что при жидкостной обработке шерстяных тканей, включающей предварительную пропитку, валку, смывку и промывку на жгутовых машинах путем выполнения стадий размыл, малая вода, средняя вода, большая вода, промывку на стадии средняя вода осуществляют путем дополнительного воздействия ультразвуковых (УЗ) колебаний на промывной раствор, в котором свободно перемещают жгуты обрабатываемой ткани. Колебания ультразвукового диапазона частот вызывают кавитацию в промывном растворе и способствуют разрушению диффузионного пограничного слоя и, следовательно, ускорению массообменного процесса промывки. Недостатком способа является скачкообразное повышение температуры промывного раствора под действием ультразвука, что оказывает влияние на прочность обрабатываемых тканей [147].

Для инициирования электрического разряда в водных промывных растворах, обладающих достаточно высокой проводимостью, используется импульс высокого напряжения с коротким фронтом и ограниченной длительностью (параметры приведены выше). Схема установки приведена на рисунке 4.1.

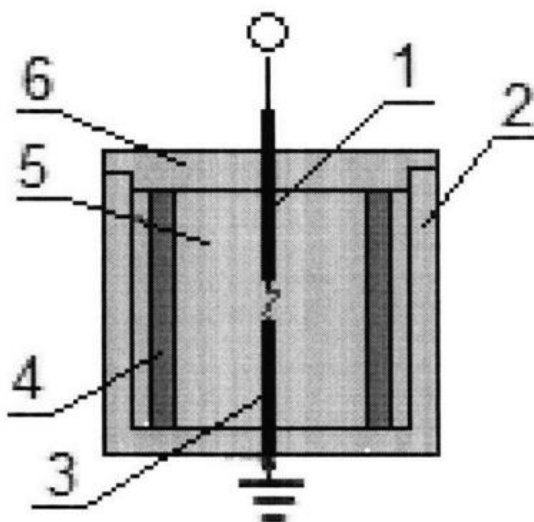


Рисунок 4.1 - Схема установки для экстрагирования:

1, 3 – электроды типа острие-острие; 2 – промывная ванна; 4 – исследуемый образец ткани; 5 – вода; 6 – крышка.

В главе 3 показано, что электрические разряды интенсифицируют не только внешний, но и внутренний массоперенос за счет кавитации, возникающих акустических течений, акустического давления и других эффектов.

Таким образом, показано, что электрические разряды в жидкости интенсифицируют процесс промывки хлопчатобумажных тканей различной плотности от гидроксида натрия после их мерсеризации.

Практические рекомендации по использованию результатов работы

Экспериментальные данные, полученные в работе, анализ данных, опубликованных в литературе, мнение специалистов по электроразрядному экстрагированию показывает, что использование импульсного электрического поля для интенсификации процесса экстрагирования может найти практическое применение. При этом возможно не только сокращение продолжительности процесса, но и уменьшение расхода электроэнергии и материальных ресурсов.

Важным является возможное снижение концентрации поверхностно-активных веществ в рабочем растворе и существенное снижение их количества в сточных водах, что даёт экономический эффект от снижения платы за сброс моющих средств в сточные воды[148–150].

С учётом рекомендаций специалистов по электроразрядному экстрагированию для практической реализации в отделочном производстве текстильных фабрик возможно использование приведенной на рисунке 4.2 технологической схемы подачи промывной воды, подвергнутой воздействию импульсного электрического поля, в промывную линию.

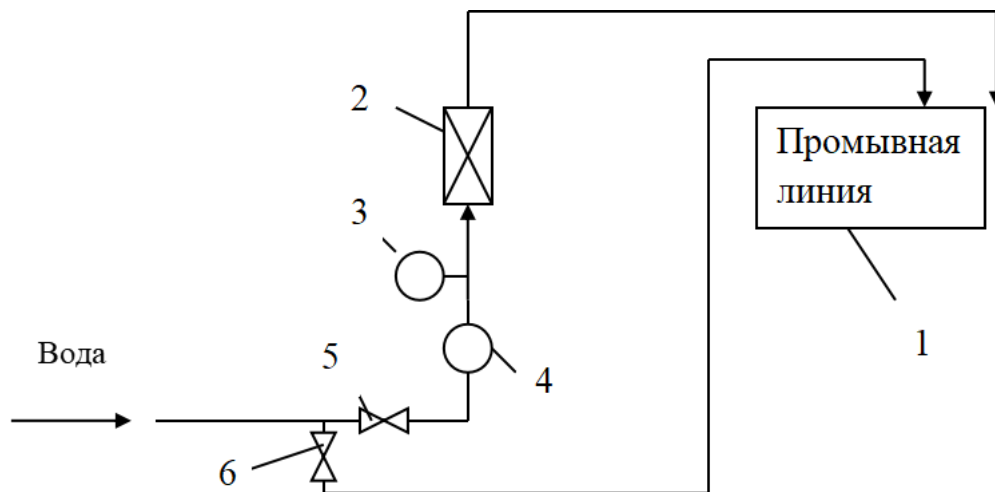


Рисунок 4.2 - Схема подачи воды, обработанной ИЭП, в промывную линию:

- 1 – промывная линия; 2 – устройство для воздействия ИЭП;
3 – манометр; 4 – электронасос; 5, 6 – вентили регулирования подачи воды.

4.2 Экологическая и производственная безопасность и энергоресурсоэффективность интенсификации процесса промывки импульсным электрическим полем

В случаях использования в качестве интенсификатора импульсного электрического поля, возникает необходимость введения особых требований к охране труда и обеспечению безопасности здоровья и жизни персонала.

Вопросы безопасности при эксплуатации электроустановок

Применение защитных мероприятий и средств регламентируется «Правилами по охране труда при эксплуатации электроустановок» и зависит от категории помещения по степени электрической опасности [151, 152].

Требования к электротехническому персоналу, обслуживающему электроустановки, изложены в Правилах технической эксплуатации электроустановок потребителей электрической энергии [153].

Любая деятельность, связанная с эксплуатацией электроустановок, подразумевает потенциальную опасность для людей (поражение электрическим током, возникновение пожаров и т.д.). У человека отсутствуют органы чувств, способные предвидеть электрическую опасность, поэтому поражения электрическим током, как правило, внезапны.

Опасность поражения человека электричеством создается тогда, когда через его тело потечет электрический ток. Наиболее опасные случаи включения тела человека в электрическую цепь – варианты: «рука – рука» и «голова – левая рука» (когда путь протекания тока проходит через жизненно важные органы – сердце и легкие) [154].

Ток, проходящий через организм человека, оказывает на него воздействие, которое может иметь различную природу:

- термическую – ожоги тела, нагрев органов (сосудов, нервов, мозга), их расстройство;
- электрическую – разложение тканей, клеток за счет направленного перемещения ионов;
- механическую – раздражительные сокращения мышц, разрыв тканей;
- биологическую – нарушение биопроцессов путем возбуждения нервных рецепторов [154].

Поражение электрическим током может привести к электротравмам (локальные поражения органов или участков тела) и электрическим ударам различной степени тяжести (от первой, которая характеризуется судорожным сокращением мышц до четвертой, которая приводит к клинической смерти). При электрическом ударе четвертой степени человек может находиться в состоянии клинической смерти (отсутствует дыхание и сердцебиение) в течение десяти минут. В случае, если не были вовремя предприняты меры по восстановлению

состояния пострадавшего (сердечно-легочная реанимация), наступает биологическая смерть.

Поражение человека электричеством может стать следствием прикосновения его не менее чем к двум точкам электрической сети, между которыми существует разность потенциалов, или электрическое напряжение ($U = \phi_1 - \phi_2$) [154].

При напряжениях свыше 1000 В опасно даже приближение к токоведущим частям. Для исключения опасности прикосновения к токоведущим частям необходимо обеспечить их недоступность. Это достигается посредством ограждения и расположения токоведущих частей на недоступной высоте или в недоступном месте. На практике применяются различные методы ограждения токоведущих частей установки: сплошные ограждения (кожухи и крышки) и сетчатые ограждения [151].

Помимо изоляции токоведущих частей, распространенными способами обеспечения электробезопасности являются:

- защитное заземление или зануление;
- защитное отключение.

Защитным заземлением называется преднамеренное электрическое соединение с землей металлических нетоковедущих частей электроустановок, которые могут оказаться под напряжением. Защитное заземление работает по принципу уменьшения напряжения прикосновения при замыкании на корпус за счет уменьшения потенциала корпуса электроустановки и подъема потенциала основания, на котором стоит человек, до потенциала, близкого по значению к потенциалу заземленной установки [151].

Принцип действия защитного заземления состоит в уменьшении потенциала заземленного оборудования при появлении на нем напряжения.

При проектировании и создании заземлений учитывают факт возникновения напряжений прикосновения и шаговых напряжений. В случае, если значения этих напряжений выше допустимого уровня, применяют групповые заземлители [154].

Зануление состоит в преднамеренном электрическом соединении металлических нетоковедущих частей электроустановок, могущих оказаться под

напряжением, с глухозаземленной нейтралью источника электроэнергии. Защитное зануление – проводник с малым электрическим сопротивлением [154].

Принцип действия защитного зануления состоит в автоматическом и быстром отключении электроустановки при опасной ситуации, которая может привести к поражению человека электрическим током (замыкание, нарушение изоляции, прикосновение к токоведущим частям).

Помимо описанных выше способов обеспечения безопасной работы электроустановки, следует обеспечить работников необходимыми средствами защиты. Согласно [155], при обслуживании электроустановок напряжением выше 1000 В используются электрозащитные средства - средства защиты от поражения электрическим током, средства защиты от электрических полей повышенной напряженности коллективные и индивидуальные, а также средства индивидуальной защиты. К таким защитным средствам относят изолирующие штанги и клещи, указатели напряжения, изолированный инструмент, защитные ограждения, диэлектрические перчатки, боты и галоши, ковры, изолирующие подставки, плакаты и знаки безопасности и др.

Для безопасной работы с электроустановками, необходимо организовать рабочее место (установить предупреждающие плакаты с информацией по технике безопасности, защитные ограждения в случае необходимости). Особенно важным является обучение персонала специфике работы с электроустановками, находящимися под высоким напряжением, проведение регулярных инструктажей, аттестация персонала (получение допусков соответствующей степени (квалификационные группы) для работы с установками, напряжением свыше 1000 В).

Стоит отметить, что при работе с электроразрядной установке в ходе выполнения эксперимента, был замечен повышенный уровень шума (хлопки, возникающие с частотой примерно 1 раз в секунду при каждом разряде). Поэтому при рассмотрении вопроса обеспечения безопасности рабочей деятельности персонала, следует учитывать также и шумовой фактор.

Шум (акустические колебания упругой среды различной интенсивности и частоты) является одним из наиболее существенных неблагоприятных факторов производственной среды. Шум оказывает на организм человека серьезное влияние. Длительное воздействие этого фактора (в течение рабочей смены) приводит к снижению внимания и увеличению количества ошибок, допускаемых рабочим при выполнении своих обязанностей. Это может привести к различным производственным травмам и особенно опасно при работе с электрическими установками, находящимися под высоким напряжением.

Выбор средств индивидуальной защиты для работы с электроустановками

В соответствии с Трудовым кодексом Российской Федерации [156], на работах с вредными и (или) опасными условиями труда, а также на работах, выполняемых в особых температурных условиях или связанных с загрязнением, работникам бесплатно выдаются прошедшие обязательную сертификацию или декларирование соответствия специальная одежда, специальная обувь и другие средства индивидуальной защиты, а также смывающие и (или) обезвреживающие средства в соответствии с типовыми нормами, которые устанавливаются в порядке, определяемом Правительством Российской Федерации.

К средствам индивидуальной защиты (СИЗ) от поражения электрическим током относятся изолирующие средства, которые делятся на основные и дополнительные [151].

Основные электрозащитные средства (ЭЗС) — это средства защиты, изоляция которых длительно выдерживает рабочее напряжение электроустановок, что позволяет с помощью их прикасаться к токоведущим частям, находящимся под напряжением. К ним относятся: изолирующие штанги, изолирующие и электроизмерительные клещи, диэлектрические перчатки, слесарно-монтажный инструмент с изолированными рукоятками, указатели напряжения. При напряжении электроустановки свыше 1000 В основные средства включают изолирующие штанги, изолирующие и электроизмерительные клещи, указатели напряжения.

Дополнительные ЭЗС — это средства защиты, изоляция которых не может длительно выдерживать рабочее напряжение электроустановок. Они применяются для защиты от напряжения прикосновения и шага, а при работе под напряжением исключительно с основными ЭЗС. К ним относятся: при напряжении до 1000 В — диэлектрические галоши, коврики, изолирующие подставки; свыше 1000 В — диэлектрические перчатки, боты, коврики, изолирующие подставки [151].

Ниже приводится сравнительная характеристика безопасности использования электроразрядной и ультразвуковой установок для экстрагирования загрязнений из текстильных материалов.

Эксплуатация электроустановки, напряжением свыше 1000 В требует осуществления значительных мер по обеспечению безопасности труда работников.

Помимо обязательного использования средств индивидуальной защиты (клещи для вставки предохранителей; гаечный ключ; отвертка; указатель напряжения; пассатижи; резиновый коврик и дорожка; изолирующая подставка; токоизмерительные клещи; дополнительные: перчатки резиновые диэлектрические; галоши и боты диэлектрические; туфли антистатические; сапоги диэлектрические и др.), необходимо обеспечить оборудование защитным заземлением (занулением или отключением).

Работа на установках, напряжением свыше 1000 В требует наличия 4 группы допуска по электробезопасности, которая присваивается по результатам аттестации в комиссии предприятия Ростехнадзора. Специалисты с четвертой группой допуска могут выполнять широкий спектр обязанностей: могут выдавать наряд на выполнение работ в электроустановках до 1000 В и выдавать распоряжения на выполнение работ в установках свыше 1000 В из перечня, утвержденного ответственным за электрохозяйство. При наличии в удостоверении пометки «до и свыше 1000 В» специалист с четвертой группой может быть производителем работ и допускающим в установках свыше 1000 В.

Специалист с высшим электротехническим образованием может получить четвертую группу допуска через два месяца работы, а человек без специального

образования – только через шесть месяцев работы по третьей группе допуска. Практиканты получить четвертую группу допуска получить не могут в принципе.

Помимо стандартных мер по электробезопасности при работе с электроустановками, работа с электроразрядной установкой требует дополнительной защиты от шума, возникающего вследствие возникновения электрических разрядов. В ходе работы над экспериментом было замечено, что данное шумовое воздействие оказывает весьма значительное влияние на работоспособность и психическое состояние не только находящихся в данном помещении людей, а также персонала, работающего этажом ниже.

Исходя из всего вышесказанного, использование электроразрядной установки для экстрагирования технологических загрязнений из текстильных материалов в промышленности сопряжено с рядом особенностей, связанных с вопросами безопасности. Использование данного процесса интересно не только в качестве интенсификатора процесса промывки текстильных материалов, но также и в других отраслях промышленности. При выполнении всех мер безопасности, такой метод интенсификации процесса промывки можно внедрять в производственный процесс.

4.3 Оценка экономической эффективности интенсификации процесса промывки ИЭП

При промывке тканей с использованием импульсного электрического поля высокой напряженности как интенсификатора осуществляется воздействие на промывной раствор и на ткань. В результате этого снижается время промывки, сокращаются расход промывной воды и концентрация моющего средства в промывном растворе, необходимых для осуществления данного процесса, снижается потребление электроэнергии. В результате снижения концентрации моющих средств в промывном растворе снижается их концентрация также и в сточных водах. Это ведет к уменьшению нагрузки на водные объекты, следовательно, снижается плата за негативное воздействие на окружающую среду.

Все это ведет к увеличению производительности и, как следствие – повышению прибыльности предприятия.

Оценка экономической эффективности интенсифицированного импульсным электрическим полем высокой напряженности процесса промывки

Данный расчет проведен для типовой линии для промывки хлопчатобумажных тканей после мерсеризации, в которую входят шесть промывных машин башенного типа ВМБ-180-10.

Расчет проводился на выпуск 5580600 п.м. легких хлопчатобумажных тканей, при работе фабрики в одну смену (8-ми часовой рабочий день) с двумя выходными.

1. Производительность одной промывной машины башенного типа ВМБ-180-10 без интенсификации ИЭП, п.м./час:

$$H_M = \frac{\Pi \cdot \text{КПВ}}{T \cdot n} \quad (4.1)$$

где: Π – производительность фабрики, п.м. в год

T – кол-во рабочих часов в году, час;

КПВ – коэффициент полезного времени машины. Для одной промывной машины башенного типа ВМБ-180-10 в составе типовой линии КПВ = 0,85 [157];

n – кол-во промывных машин после процесса мерсеризации, $n = 6$;

$\Pi = 5580600$ п.м.;

T на 2023 год составляет 1973 часов при 40-часовой неделе.

$$H_M = \frac{5580600 \cdot 0,85}{1973 \cdot 6} = 401 \text{ п.м./год}$$

2. Производительность одной промывной машины башенного типа ВМБ-180-10 с интенсификацией ИЭП, п.м./час:

$$H'_M = H_M \cdot \Delta\tau \quad (4.2)$$

где $\Delta\tau$ – сокращение общей продолжительности процесса промывки. Сокращение продолжительности процесса промывки при использовании импульсного поля высокой напряженности определяется в результате экспериментов и составляет в данном случае 33,3%.

$$H'_M = 401 \cdot 1,333 = 534 \text{ п. м./час}$$

3. Количество промывных машин башенного типа ВМБ-180-10, необходимое для выпуска такого кол-ва продукции при тех же технологических параметрах процесса с интенсификацией ИЭП:

$$n' = \frac{П \cdot КПВ}{H'_M \cdot T} \quad (4.3)$$

$$n' = \frac{5580600 \cdot 0,85}{534 \cdot 1973} = 5$$

4. Затраты на электрическую энергию.

4.1. Затраты на электрическую энергию без интенсификации ИЭП, руб.:

$$З_э = N_{1M} \cdot n \cdot Ц_э \cdot T \quad (4.4)$$

где N_{1M} – установленная мощность одной машины. Для промывной машины башенного типа ВМБ-180-10 $N_{1M} = 9,5$ кВт/час

$Ц_э$ – это стоимость 1 кВт/час. На 2023 для предприятий в среднем по Москве составляет 6 руб за кВт/час.

$$З_э = 9,5 \cdot 6 \cdot 6 \cdot 1973 = 674766 \text{ руб.}$$

4.2. Затраты на электрическую энергию с интенсификацией ИЭП, руб.:

$$З'_э = (N_{1M} \cdot n' + N_{1эп} \cdot m) \cdot Ц_э \cdot T \quad (4.5)$$

$N_{эп}$ – мощность, потребляемая электроразрядной установкой, кВт/час (2,9 кВт/час [52]);

m – кол-во установок на линии, $m = 1$.

$$З'_э = (9,5 \cdot 5 + 2,9 \cdot 1) \cdot 6 \cdot 1973 = 596635,2 \text{ руб.}$$

4.3. Таким образом, сокращение затрат на электрическую энергию, руб.:

$$\Delta C_э = З_э - З'_э \quad (4.6)$$

$$\Delta C_э = 674766 - 596635,2 = 78130,8 \text{ руб.}$$

Расходы уменьшились на 11,6%.

5. Затраты на воду

5.1. Затраты на воду при старом режиме работы без интенсификации ИЭП, руб.:

$$З_в = W_1 \cdot n \cdot Ц_в \cdot T \quad (4.7)$$

где W_1 – расход воды одной машиной, м³/час. Для промывной машины башенного типа ВМБ-180-10, $W_1 = 4,65$ м³/час [1].

Π_B – стоимость 1 м³ технологической воды, руб. Стоимость для г. Москвы на 2023 год составляет 10,50 руб.

$$Z_B = 4,65 \cdot 6 \cdot 10,5 \cdot 1973 = 577990,35 \text{ руб.}$$

5.2. Затраты на воду с интенсификацией ИЭП, руб.

$$Z'_B = W_1 \cdot n' \cdot \Pi_B \cdot T \quad (4.8)$$

$$Z'_B = 4,65 \cdot 5 \cdot 10,5 \cdot 1973 = 481658,63 \text{ руб.}$$

5.3. Таким образом, сокращение затрат на воду, руб.:

$$\Delta C_B = Z_B - Z'_B \quad (4.9)$$

$$\Delta C_B = 577990,35 - 481658,63 = 96331,72 \text{ руб.}$$

Снижение затрат на 16,7%.

6. Затраты на моющие средства

6.1. Затраты на моющее средство без интенсификации ИЭП, руб.:

$$Z_{\text{м.с.}} = P_{\text{м.с.}} \cdot \Pi_{1.\text{м.с.}} \cdot W_1 \cdot T \quad (4.10)$$

$P_{\text{м.с.}}$ – расход моющего средства без интенсификации ИЭП, кг/м³ воды.

Расход ПАВ про промывку хлопчатобумажных тканей после мерсеризации при режиме промывки без интенсификации ИЭП составляет 1,5 кг/м³

$\Pi_{1.\text{м.с.}}$ – стоимость 1 кг моющего средства, руб. Стоимость 1 кг моющего средства ВИК С составляет 216 р. с учетом НДС (ООО "НПФ" Траверс").

$$Z_{\text{м.с.}} = 1,5 \cdot 216 \cdot 4,65 \cdot 1973 = 2972521,8 \text{ руб}$$

6.2. Затраты на моющее средство с интенсификацией ИЭП, руб.:

$$Z'_{\text{м.с.}} = P'_{\text{м.с.}} \cdot \Pi_{1.\text{м.с.}} \cdot W_1 \cdot T \quad (4.11)$$

$P'_{\text{м.с.}}$ – расход моющего средства с интенсификацией ИЭП, кг/м³ воды. При использовании электроразрядного воздействия на промывной раствор расход ПАВ на промывку хлопчатобумажных тканей после мерсеризации может быть сокращен на 0,7 кг/м³ воды и, следовательно, составляет $P'_{\text{м.с.}} = 0,8$ кг/м³ [1, 62, 148, 149].

$$Z'_{\text{м.с.}} = 0,8 \cdot 216 \cdot 4,65 \cdot 1973 = 1585344,96 \text{ руб.}$$

6.3. Таким образом, сокращение затрат на моющее средство, руб.:

$$\Delta C_B = Z_{\text{м.с.}} - Z'_{\text{м.с.}} \quad (4.12)$$

$$\Delta C_B = 2972521,8 - 1585344,96 = 1387176,84 \text{ руб.}$$

Снижение затрат на 46,7%.

7. Экономия от внедрения технологического режима промывки хлопчатобумажных тканей после мерсеризации с использованием электроразрядного оборудования:

$$\mathcal{E} = \Delta C_9 + \Delta C_B + \Delta C_{\text{м.с.}} \quad (4.13)$$

$$\mathcal{E} = 78130,8 + 96331,72 + 1387176,84 = 1561639,36 \text{ руб.}$$

Ожидаемый экономический эффект от внедрения предлагаемого технологического режима составляет 1561639,36 руб./год. Данная величина сокращения суммарных затрат говорит о экономической эффективности практического применения нового режима промывки с использованием электроразрядного оборудования.

Оценка экономической эффективности от снижения загрязнений сточных вод при внедрении технологического режима промывки хлопчатобумажных тканей после мерсеризации при использовании в качестве интенсификатора импульсного электрического поля высокой напряженности

При воздействии на промывной раствор электрического поля при промывке тканей может быть снижена концентрация моющего средства (ПАВ) в промывном растворе, особенно при применении смеси (ПАВ) [45, 68, 148, 150]. Это обусловлено тем, что импульсное интенсифицирующее воздействие способствует увеличению пенообразующей и эмульгирующей способности моющих средств, снижает поверхностное натяжение и вязкость рабочего раствора.

Промывка моющим средством лёгких хлопчатобумажных тканей после мерсеризации на типовой линии осуществляется, как правило, только в одной промывной башенной машине. Но при этом ПАВ существенно загрязняют сточные воды, оказывают вредное воздействие в рабочей зоне, поэтому даже небольшое снижение концентрации ПАВ повышает экологическую и производственную безопасность [158].

Основополагающим нормативно-правовым документом по охране окружающей среды и основанием взимания платы за негативное воздействие на окружающую среду (НВОС), является Федеральный закон «Об охране окружающей среды» № 7-ФЗ от 2002 г. (с изменениями на 8 августа 2024 года) [159]. Перечень загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды принят распоряжением Правительства Российской Федерации от 20 октября 2023 года N 2909-р [160].

Исходными, для расчета платы за загрязнение поверхностных и подземных объектов, являются данные, полученные на кафедре Энергоресурсоэффективных технологий, промышленной экологии и безопасности (ЭТПЭБ), РГУ имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство) и данные хлопчатобумажной фабрики с производительностью 9301000 погонных метра хлопчатобумажных тканей в год, из которых 60% приходится на лёгкие хлопчатобумажные ткани (5580600 п.м.).

Рассматривались промывные машины с горизонтальной заправкой ткани и расходом воды на линии- 2,85 м³/1000 п.м. Загрязнитель сточной воды - поверхностно-активное вещество «ВИК С», ТУ 2484-017-17965829-07 с изм. 1, 2 которое является композицией, состоящей из анионного поверхностно-активного вещества (АПАВ) и неионогенного поверхностно-активного вещества (НПАВ), производитель ЗАО «Экос-1».

Расчет платы производится на основании постановления Правительства №881 от 31.05.2023 [161], ставки платы определяются постановлением Правительства №913 от 13.09.2016 [162].

Согласно постановлению Правительства РФ от 31 мая 2023 г. № 881 “Об утверждении Правил исчисления и взимания платы за негативное воздействие на окружающую среду и о признании утратившими силу некоторых актов Правительства Российской Федерации и отдельного положения акта Правительства Российской Федерации”, пункту 27, плата за выбросы загрязняющих веществ, плата за негативное воздействие при осуществлении сбросов загрязняющих веществ (далее - плата за сбросы загрязняющих веществ) в пределах (равных или

менее) нормативов допустимых выбросов или нормативов допустимых сбросов, технологических нормативов, а также плата за выбросы загрязняющих веществ, плата за сбросы загрязняющих веществ в случаях, предусмотренных пунктами 14 - 17 и 19 настоящих Правил ($\Pi_{нд}$), рассчитываются по формуле:

$$\Pi_{нд} = \sum_{i=1}^n (M_{ндi} \cdot H_{плi} \cdot K_{от} \cdot K_{нд} \cdot K_{во} \cdot K_{инд}) \quad (4.14)$$

где:

n - количество загрязняющих веществ, $n = 1$;

$M_{ндi}$ - платежная база за выбросы загрязняющих веществ или сбросы загрязняющих веществ в отношении i -го загрязняющего вещества, определяемая лицом, обязанным вносить плату, за отчетный период как объем или масса выбросов загрязняющих веществ или сбросов загрязняющих веществ в количестве, равном либо менее установленных нормативов допустимых выбросов или нормативов допустимых сбросов, технологических нормативов, тонн (куб. м).

$H_{плi}$ - ставка платы за выбросы загрязняющих веществ или сбросы загрязняющих веществ в отношении i -го загрязняющего вещества, рублей/тонн (рублей/куб. м);

$K_{от}$ - дополнительный коэффициент к ставкам платы в отношении территорий и объектов, находящихся под особой охраной в соответствии с федеральными законами, равный 2;

$K_{нд}$ - коэффициент к ставкам платы за выбросы загрязняющих веществ или сбросы загрязняющих веществ в отношении i -го загрязняющего вещества, применяемый за объем или массу выбросов загрязняющих веществ, сбросов загрязняющих веществ в пределах нормативов допустимых выбросов, нормативов допустимых сбросов, равный 1;

$K_{во}$ - коэффициент к ставкам платы за сбросы загрязняющих веществ организациями, эксплуатирующими централизованные системы водоотведения поселений или городских округов, при сбросах загрязняющих веществ, не относящихся к веществам, для которых устанавливаются технологические показатели наилучших доступных технологий в сфере очистки сточных вод с

использованием централизованных систем водоотведения поселений или городских округов (за исключением периода реализации организациями, эксплуатирующими централизованные системы водоотведения поселений или городских округов, программ повышения экологической эффективности, планов мероприятий по охране окружающей среды), равный 0,5;

$K_{\text{инд}}$ - дополнительный коэффициент, применяемый к ставкам платы, устанавливаемый Правительством Российской Федерации в соответствии с пунктом 4 статьи 16³ Федерального закона "Об охране окружающей среды".

В соответствии с пунктом 4 статьи 16³ Федерального закона "Об охране окружающей среды" ставки платы за негативное воздействие на окружающую среду и дополнительные коэффициенты устанавливаются Правительством Российской Федерации.

В целях стимулирования юридических лиц и индивидуальных предпринимателей, осуществляющих хозяйственную и (или) иную деятельность, к проведению мероприятий по снижению негативного воздействия на окружающую среду и внедрению наилучших доступных технологий при исчислении платы за негативное воздействие на окружающую среду к ставкам такой платы применяются следующие коэффициенты:

коэффициент 0 - за объем или массу выбросов загрязняющих веществ, сбросов загрязняющих веществ в пределах технологических нормативов после внедрения наилучших доступных технологий на объекте, оказывающем негативное воздействие на окружающую среду;

коэффициент 0 - за объем или массу отходов производства и потребления, подлежащих накоплению и фактически утилизированных с момента образования в собственном производстве в соответствии с технологическим регламентом или переданных для утилизации в течение срока, предусмотренного законодательством Российской Федерации в области обращения с отходами;

коэффициент 1 - за объем или массу выбросов загрязняющих веществ, сбросов загрязняющих веществ в пределах нормативов допустимых выбросов, нормативов допустимых сбросов;

коэффициент 1 - за объем или массу отходов производства и потребления, размещенных в пределах лимитов на их размещение, а также в соответствии с отчетностью об образовании, утилизации, обезвреживании, о размещении отходов производства и потребления, представляемой в соответствии с законодательством Российской Федерации в области обращения с отходами;

коэффициент 25 - за объем или массу выбросов загрязняющих веществ, сбросов загрязняющих веществ в пределах временно разрешенных выбросов, временно разрешенных сбросов, а также за объем или массу выбросов загрязняющих веществ, сбросов загрязняющих веществ, превышающих установленные для объектов III категории нормативы допустимых выбросов, нормативы допустимых сбросов;

коэффициент 25 - за объем или массу отходов производства и потребления, размещенных с превышением установленных лимитов на их размещение либо указанных в декларации о воздействии на окружающую среду, а также в отчетности об образовании, утилизации, обезвреживании, о размещении отходов производства и потребления, представляемой в соответствии с законодательством Российской Федерации в области обращения с отходами;

коэффициент 100 - за объем или массу выбросов загрязняющих веществ, сбросов загрязняющих веществ, превышающих установленные для объектов I категории такие объем или массу, а также превышающих указанные в декларации о воздействии на окружающую среду для объектов II категории такие объем или массу.

В расчёте учитывали платёжную базу за сброс загрязняющего вещества ($M_{нд}$), ставку платы за сброс загрязняющего вещества ($H_{пл}$) и дополнительный коэффициент ($K_{инд}$), применяемый к ставкам платы, устанавливаемый Правительством Российской Федерации в соответствии с пунктом 4 статьи 16³ Федерального закона "Об охране окружающей среды".

Платежная база за сброс ПАВ ВИК С без применения для интенсификации процесса промывки электроразрядного оборудования:

$$M_{\text{нд}} = \frac{T \cdot P_{\text{ВИК С}} W_1}{1000}, \text{ т/год} \quad (4.15)$$

где: T - количество рабочих часов в году. Количество рабочих часов в 2023 году составило 1973 ч.

$P_{\text{ВИК С}}$ - расход ПАВ при режиме промывки без интенсификатора. Согласно экспериментальным данным, полученным при изучении процесса промывки на кафедре ПАХТ и БЖД МГТУ им. А.Н. Косыгина [1, 62, 148, 149], принимаем значение расхода ПАВ при промывке без интенсификатора равным 1,5 г/л, а с интенсификатором ИЭП равным 0,8 г/л;

W_1 - расход воды на одну промывную машину, м³/час. $W_1 = 4,65 \text{ м}^3/\text{час}$.

$$M_{\text{нд}} = \frac{1973 \cdot 1,5 \cdot 4,65}{1000} = 13,761675 \text{ т/год}$$

Платежная база за сброс ПАВ ВИК С с применением ИЭП:

$$M'_{\text{нд}} = \frac{1973 \cdot 0,8 \cdot 4,65}{1000} = 7,33956 \text{ т/год}$$

Постановлением Правительства РФ от 20 марта 2023 г. N 437 [163] установлено, что в 2023 г. ставки платы за негативное воздействие на окружающую среду, установленные на 2018 г., применяются с использованием дополнительно к иным коэффициентам коэффициента 1,26.

Ставки платы за сброс ПАВ согласно Постановлению Правительства РФ от 13 сентября 2016 г. N 913 "О ставках платы за негативное воздействие на окружающую среду и дополнительных коэффициентах", составляют:

- 1) для АПАВ 1192,3 р. за одну тонну вещества в 2018 г.;
- 2) для НПАВ так же 1192,3 р. за одну тонну вещества в 2018 г.

Таким образом, ставки платы за сброс ПАВ в 2023 г. с учетом коэффициента 1,26 составляют 1502,3 р. за одну тонну вещества.

Согласно постановлению Правительства РФ от 31.12.2020 N 2398 (ред. от 07.10.2021) "Об утверждении критериев отнесения объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, к объектам I, II, III и IV категорий" [164] предприятия по производству текстильных изделий с использованием оборудования для промывки, отбеливания, мерсеризации, окрашивания

текстильных волокон и (или) отбеливания, окрашивания текстильной продукции (с проектной производительностью 10 тонн обработанного сырья в сутки и более) относятся к объектам I категории.

Коэффициент $K_{\text{инд}}$ принимаем равным 100.

Плата за НВОС за сброс ВИК С в расчете на одну промывную машину для типового предприятия при режиме промывки без интенсификатора составит:

$$P_{\text{нд}} = M_{\text{нд}} \cdot H_{\text{пл}} \cdot K_{\text{инд}} = 13,761675 \cdot 1502,3 \cdot 100 = 2067416,4 \text{ р/год}$$

Плата за НВОС за сброс ВИК С в расчете на одну промывную машину для типового предприятия при режиме промывки с использованием интенсификатора ИЭП составит:

$$P'_{\text{нд}} = M'_{\text{нд}} \cdot H'_{\text{нд}} \cdot K_{\text{инд}} = 7,33956 \cdot 1502,3 \cdot 100 = 1102622,1 \text{ р/год}$$

Таким образом, плата за НВОС при использовании ИЭП в процессе промывки позволяет сократить количество сбросов и достичь снижения платы за НВОС за сброс ПАВ в 1,9 раз.

Плата за НВОС за сброс ВИК С в расчете на один погонный метр выпускаемой ткани (при режиме промывки без интенсификации ИЭП составит):

$$P_{\text{нд.п.м.}} = \frac{P_{\text{нд}}}{5580600} = \frac{2067416,4}{5580600} = 0,37 \frac{\text{руб}}{\text{п. м.}}$$

Плата за НВОС за сброс ВИК С в расчете на один погонный метр выпускаемой ткани (при режиме промывки с интенсификатором ИЭП составит):

$$P'_{\text{нд.п.м.}} = \frac{P'_{\text{нд}}}{5580600} = \frac{1102622,1}{5580600} = 0,198 \frac{\text{руб}}{\text{п. м.}}$$

Сокращение платы за НВОС в расчете на один погонный метр составляет:

$$P''_{\text{нд.п.м.}} = \frac{P_{\text{нд}} - P'_{\text{нд}}}{5580600} = \frac{964794,3}{5580600} = 0,173 \frac{\text{руб}}{\text{п. м.}}$$

Немаловажным является и то, что метод сокращения расхода ПАВ и стабилизаторов в технологиях беления и промывки за счет использования устройств и оборудования, оптимизирующих процесс подготовки, описан в ИТС по наилучшим доступным технологиям ИТС 39-2023 Производство текстильных изделий [165].

Таблица 4.1 - Результаты расчетов снижения платы за НВОС при сбросе ПАВ в расчете на одну промывную машину

№	Параметр	Промывка после мерсеризации		Снижение параметра
		Без ИЭП	С ИЭП	
1	Платежная база за сброс загрязняющего вещества (ПАВ), т/год	13,761675	7,33956	на 6,422115
2	Плата за сброс загрязняющего вещества (ПАВ), руб./год	2067416,4	1102622,1	на 964794,3
3	Плата за сброс загрязняющего вещества (ПАВ), в расчете на 1 п.м. выпускаемой ткани, руб./п.м.	0,37	0,198	на 0,173

Как видно из таблицы 4.1, платежная база и плата за сброс загрязняющего вещества (ПАВ) сокращаются в 1,9 раз.

Выводы по главе

Показана возможность практического использования выбранного способа для снижения энергоресурсоёмкости и повышения экологической безопасности изученного процесса с применением ИЭП. Влияние импульсного электрического поля сказывается как в первом, так и во втором периодах процесса, ускоряя оба периода. Интегральный эффект от применения интенсификаторов выражается в сокращении продолжительности процесса промывки для достижения требуемой остаточной концентрации загрязнения в ткани, что приводит к снижению расхода электроэнергии и чистой промывной воды на ~12 и ~17% соответственно, к снижению концентрации поверхностно-активных веществ в технологическом растворе с 1,5 кг/м³ до 0,8 кг/м. В результате снижения концентрации моющих средств в промывном растворе снижается их концентрация также и в сточных водах. Это ведет к уменьшению экологической нагрузки на водные объекты и платы за загрязнение окружающей среды практически вдвое.

Получен патент Российской Федерации «Способ и устройство для отделки хлопчатобумажных тканей различной плотности воздействием импульсных электрических разрядов» от 19.01.2023. Для практической реализации в соответствии с полученным патентом рекомендован встроенный в промывное оборудование источник высоковольтных им-пульсов напряжения, позволяющий реализовать способ промывки хлопчатобумажных тканей различной плотности от

гидроксида натрия после их мерсеризации, включающий размещение ткани в промывной ванне с водой с погруженными в нее электродами, и воздействие импульсными электрическими разрядами на ткань, отличающийся тем, что импульсные электрические разряды подаются с амплитудой напряжения до 50 кВ, фронтом $t_f = 0,1$ мкс, длительностью импульса $t_{и} = 0,8$ мкс. Изобретение может применяться в отделочном производстве при промывке хлопчатобумажных тканей. Интенсивная турбулентность, кавитационные эффекты и ударноволновое воздействие, инициированное электрическим разрядом в промывной жидкости, значительно ускоряют процесс массопереноса, что существенно повышает эффективность промывки текстильного материала.

С учётом рекомендаций специалистов по электроразрядному экстрагированию для практической реализации в отделочном производстве текстильных фабрик рекомендована технологическая схема подачи промывной воды, подвергнутой воздействию импульсного электрического поля, в промывную линию, а также встроенный в промывное оборудование источник высоковольтных импульсов напряжения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основании анализа научно-технической литературы, патентных источников и нормативно-технической документации показана актуальность работ по снижению энергоресурсоёмкости и улучшению экологических показателей массообменного процесса промывки хлопчатобумажных тканей от технологических загрязнений и количественной оценке его интенсификации импульсным электрическим полем.

2. Проведены экспериментальные исследования кинетики промывки с ИЭП. Установлено влияние ИЭП как в первом, так и во втором периодах процесса промывки, что соответствует смешанной задаче массообмена. Сокращение продолжительности процесса в первом периоде промывки составило 70%, а во втором – 32%.

3. Дана количественная оценка влияния импульсного электрического поля на кинетические коэффициенты массоотдачи и массопроводности в процессе экстрагирования гидроксида натрия из хлопчатобумажной ткани после мерсеризации. Получены значения кинетических коэффициентов, необходимых для анализа кинетики процесса и кинетических расчетов. Установлено, что воздействие ИЭП повышает коэффициенты массоотдачи и массопроводности в 1,85 и 1,5 раза соответственно.

4. Проведён анализ сорбционных свойств хлопчатобумажных тканей и установлены математические зависимости для аппроксимации экспериментальных сорбционных кривых с использованием уравнений Цимерманиса и Гендерсона. Установлено, что уравнение изотермы сорбции Цимерманиса наиболее точно аппроксимирует экспериментальные сорбционные кривые различных капиллярно-пористых материалов, в том числе хлопчатобумажных тканей.

5. Показано, что при воздействии импульсного электрического поля на промывной раствор происходит снижение сил поверхностного натяжения и повышение смачиваемости, что интенсифицирует диффузию извлекаемых компонентов в жидкую фазу. Коэффициент поверхностного натяжения снижается с $73 \cdot 10^{-3}$ Н/м до $65 \cdot 10^{-3}$ Н/м после обработки воды ИЭП в течение 200 с.

6. Разработана математическая модель, базирующаяся на классическом

уравнении диффузии, для аппроксимации кинетики интенсифицированных импульсным воздействием процессов промывки и применения в кинетических расчетах. Получено аналитическое решение краевой задачи применительно к среднему по сечению значению концентрации технологического загрязнения ткани.

7. Предложены новые способ и устройство для промывки хлопчатобумажных тканей различной плотности воздействием импульсных электрических разрядов, защищенные патентом № RU 2788462 С2 Российская Федерация, МПК D06C 7/00. Способ и устройство для отделки хлопчатобумажных тканей различной плотности воздействием импульсных электрических разрядов : N 2021106403: заявл. 11.03.2021 : опубл. 19.01.2023.

8. Применение ИЭП в процессе промывки хлопчатобумажных тканей приводит к сокращению продолжительности процесса промывки для достижения требуемой остаточной концентрации загрязнения в ткани на $\sim 33\%$, к снижению расхода электроэнергии и чистой промывной воды на ~ 12 и $\sim 17\%$ соответственно, концентрации поверхностно-активных веществ в технологическом растворе с $1,5 \text{ кг/м}^3$ до $0,8 \text{ кг/м}^3$, и, как следствие, в сточных водах. Это ведет к уменьшению экологической нагрузки на водные объекты, и платы за загрязнение окружающей среды практически вдвое.

9. Отдельные положения диссертации прошли апробацию в условиях ООО «ЭСМ», Бийского технологического института (филиала) Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова и АО «НТЦ Промышленная безопасность», результаты которой подтверждают эффективность предложенных решений.

10. Отдельные результаты исследования рекомендуется использовать в учебном процессе подготовки бакалавров и магистров по направлениям 20.03.01 и 20.04.01 Техносферная безопасность.

11. Показаны перспективы применения полученных результатов и развития исследований при совершенствовании процесса промывки различных тканей после отделочных операций и оценке эффективности интенсифицирующих воздействий на него.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сажин, Б. С. Процессы сушки и промывки текстильных материалов / Б. С. Сажин, М. К. Кошелева, М. Б. Сажина / Под общей редакцией Б.С. Сажина. – ФГБОУ ВО «Московский государственный университет дизайна и технологии», 2013. – 301 с. – ISBN 978-5-87055-187-6.
2. Одинцова, О. И. Основы текстильного материаловедения : учебное пособие / О. И. Одинцова, М. Н. Кротова, С. В. Смирнова. – Иван. гос. химико-технолог. ун-т. – Иваново, 2009. – 64 с.
3. Кирюхин, С. М. Текстильное материаловедение / С. М. Кирюхин, Ю. С. Шустов. – Москва : КолосС, 2011. – 360 с. – ISBN 978-5-9532-0619-8.
4. Кукин, Г. Н. Текстильное материаловедение (текстильные полотна и изделия): Учеб. для вузов / Г. Н. Кукин, А. Н. Соловьев, А. И. Кобляков. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Легпромбытиздат, 1992. – 272 с. – ISBN 5-7088-0458-0.
5. ГОСТ 29298-2005. Ткани хлопчатобумажные и смешанные бытовые. Общие технические условия (с Поправкой): межгосударственный стандарт : разработан ФГУП ЦНИХБИ : внесен Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии : принят Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол N 28 от 9 декабря 2005 г.) // Электронный фонд нормативно-технической и нормативно-правовой информации Консорциума «Кодекс» [сайт]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200044808>. – URL: (дата обращения: 12.03.2022). – Текст : электронный.
6. Григорьева, Е. А. Влияние отделки на качественные характеристики бельевых бязей / Е. А. Григорьева, Т. А. Шарова // Проблемы идентификации, качества и конкурентоспособности потребительских товаров. – 2015. – С. 115-121.
7. Бузов, Б. А. Материаловедение в производстве изделий легкой промышленности (швейное производство): Учебник для студ. высш. учеб. заведений / Б. А. Бузов, Н. Д. Алыменкова Под ред. Б.А. Бузова. – Москва : Издательский центр «Академия», 2004. – 448 с. – ISBN 5-7695-1345-4.
8. Тепловые и массообменные свойства материалов легкой промышленности :

монография / Л. Т. Бахшиева, В. С. Салтыкова, А. А. Захарова, [и др.]. – Москва : РГУ им. А.Н. Косыгина, 2015. – 140 с.

9. Захарова, А. А. Теплопроводность пористых материалов / А. А. Захарова, В. С. Салтыкова, Л. В. Моисеева // Технологии, дизайн, наука, образование в контексте инклюзии : Сборник научных трудов. – 2018. – Т. Часть 2. – С. 126-129.

10. Кошелева, М. К. Анализ свойств объектов технологической обработки в химической и текстильной промышленности : учебно-методическое пособие / М. К. Кошелева. – Москва : РГУ им. А.Н. Косыгина, 2020. – 28 с.

11. Кошелева, М. К. Анализ свойств хлопковых объектов сушки в химической технологии отделки / М. К. Кошелева, Т. А. Новикова, М. З. Цинцадзе // Сушка, хранение и переработка продукции растениеводства / Сборник научных трудов Международного научно-технического семинара, посвящённого 175-летию со дня рождения К.А. Тимирязева. – 2018. – С. 110-114.

12. Кошелева, М. К. Исследование сорбционных свойств хлопчатобумажных тканей в технологических операциях отделки / М. К. Кошелева, О. Р. Дорняк, Т. А. Новикова // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2016. – № 3(363). – С. 242-246.

13. Папков, С. П. Взаимодействие целлюлозы и целлюлозных материалов с водой / С. П. Папков, Э. З. Файнберг. – Москва : Химия, 1976. – 231 с.

14. Грег, С. Адсорбция, удельная поверхность, пористость. Пер. с англ. под ред. Дубинина М.М. / С. Грег, К. Синг. – Москва : Госиздат иностр. лит., 1948. – 784 с.

15. Сажин, Б. С. Анализ сорбционных свойств текстильных материалов как объектов сушки / Б. С. Сажин, М. К. Кошелева, Т. А. Литвинова // II сборник научно-исследовательских работ МТИ – ЛМТИ. – Москва : Либерец, 1983. – С. 377-382.

16. Кошелева, М. К. Исследование хлопчатобумажной ткани как объекта технологической обработки / М. К. Кошелева, Д. А. Наумов // Успехи в химии и химической технологии. – 2007. – Т. 21. – № 11 (79). – С. 101-103.

17. Смирнов, В. И. Промывка тканей: кинетика процесса, интенсификация,

методы технологического расчета / В. И. Смирнов, Н. Ф. Калабин, С. Л. Халезов. – Иваново : ИГТА, 2006. – 254 с. – ISBN 5-88954-222-2.

18. Кричевский, Г. Е. Химическая технология текстильных материалов / Г. Е. Кричевский, М. В. Корчагин, А. В. Сенахов Под ред. Г. Е. Кричевского. – Москва : Легпромбытиздат, 1985. – 640 с.

19. Роговин, З. А. Основы химии и технологии химических волокон. Т. I. Общие принципы получения химических волокон / З. А. Роговин. – Москва : Химия, 1974. – 520 с.

20. Петерс, Р. Х. Текстильная химия (Очистка текстильных материалов от загрязнений) / Р. Х. Петерс Перевод с английского Г.Е. Кричевского. – Москва : Легкая индустрия, 1973. – 212 с.

21. Никольская, С. А. Химические операции подготовки текстильных материалов / С. А. Никольская, О. Г. Циркина. – Иваново : Ивановская государственная текстильная академия, . – 36 с.

22. Рудобашта, С. П. Массоперенос в системах с твёрдой фазой / С. П. Рудобашта Под ред. А. Н. Плановского. – Москва : Химия, 1980. – 248 с.

23. Рудобашта, С. П. Электроразрядное экстрагирование / С. П. Рудобашта, В. Т. Казуб. – Москва : ИКЦ Колос-с, 2022. – 259 с. – ISBN 978-5-00129-260-9.

24. Аксельруд, В. А. Экстрагирование (система твёрдое тело - жидкость) / В. А. Аксельруд, В. М. Лысянский. – Ленинград : Химия, 1974. – 256 с.

25. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А. Г. Касаткин. – 8-е изд., перераб. – Москва : Химия, 1971. – 784 с.

26. Кошелева, М. К. Процессы и аппараты текстильных технологий в примерах, лабораторных работах и тестах : учебное пособие / М. К. Кошелева. – Москва : ИНФРА-М, 2020. – 320 с. – ISBN 978-5-16-015277-6.

27. Меретуков, З. А. Массообменные и механические процессы : учебное пособие по дисциплине «Процессы и аппараты пищевых производств» для студентов технических специальностей и направлений подготовки бакалавров (очной и заочной форм обучения) / З. А. Меретуков. – Майкоп : Кучеренко В. О., 2015. – 223 с. – ISBN 978-5-906696-34-2.

28. Процессы и аппараты химической технологии. Общий курс. Книга 1 / В. Г. Айнштейн, М. К. Захаров, Г. А. Носов, [и др.] под редакцией В. Г. Айнштейна. – 8-е изд., стер. – Санкт-Петербург [и др.] : Лань, 2019. – 916 с. – ISBN 978-5-8114-2975-2.
29. Рудобашта, С. П. Определение коэффициентов массоотдачи и массопроводности из кривых кинетики / С. П. Рудобашта, М. К. Кошелева // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2015. – № 6 (360). – С. 175-180.
30. Кошелева, М. К. Влияние ультразвукового поля на кинетические коэффициенты в процессе экстрагирования / М. К. Кошелева, С. П. Рудобашта // Инженерно-физический журнал. – 2019. – Т. 92. – № 5. – С. 2404-2409.
31. Рудобашта, С. П. Нестационарная массоотдача у поверхности цилиндрического тела / С. П. Рудобашта, М. К. Кошелева, Э. М. Карташов // Инженерно-физический журнал. – 2015. – Т. 88. – № 6. – С. 1276-1284.
32. Рудобашта, С. П. Экстрагирование целевых компонентов из твердой фазы / С. П. Рудобашта // 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»). – Москва : ФГБОУ ВО «РГУ им. А. Н. Косыгина», 2024. – С. 89-96.
33. Абиев, Р. Ш. Моделирование процесса экстрагирования из капиллярно-пористой частицы с бидисперсной структурой / Р. Ш. Абиев, Г. М. Островский // Теорет. основы хим. технологии. – 2001. – Т. 35. – № 3. – С. 270-275.
34. Иванов, Е. В. Экстрагирование из волокнистых пористых материалов : специальность 05.17.08 «Процессы и аппараты химических технологий» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Иванов Евгений Васильевич ; С.-Петерб. гос. технол. ин-т. – Санкт-Петербург, 2008.
35. Кошелева, М. К. Определение коэффициентов массопереноса в хлопчатобумажных тканях на основе кинетических кривых сорбционного

увлажнения / М. К. Кошелева, О. Р. Дорняк, М. С. Апалькова // Сборник материалов международной научно-технической конференции «Дизайн, технологии и инновации в текстильной и легкой промышленности (ИННОВАЦИИ-2016)». – Москва : Московский государственный университет дизайна и технологии, 2016. – Т. 2. Часть 2. – С. 183-186.

36. Кошелева, М. К. Выбор параметров процесса сушки капиллярно-пористого материала / М. К. Кошелева, О. Р. Дорняк, М. С. Апалькова // Промышленная теплотехника. – 2015. – Т. 37. – № 7. – С. 166-167.

37. Лыков, А. В. Тепломассообмен / А. В. Лыков. – Москва : Энергия, 1971. – 560 с.

38. Нигматулин, Р. И. Основы механики гетерогенных сред / Р. И. Нигматулин. – Москва : Наука, 1978. – 336 с.

39. Дорняк, О. Р. Тепломассоперенос в ненасыщенных коллоидных капиллярно-пористых анизотропных материалах : специальность 01.04.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Дорняк Ольга Роальдовна ; Воронеж. гос. техн. ун-т. – Воронеж, 2006. – 340 с.

40. Дорняк, О. Р. Расчет кинетических коэффициентов массопереноса в волокнистых коллоидных капиллярно-пористых материалах / О. Р. Дорняк // Сборник трудов Третьей Международной научно-практической конференции «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов) СЭТТ-2008». – Москва : Московский государственный университет пищевых производств, 2008. – С. 162-166.

41. Метод определения коэффициента диффузии связанного вещества в капиллярно-пористых материалах / Н. И. Никитенко, Ю. Ф. Снежкин, Н. Н. Сороковая, Ю. Н. Кольчик // Труды междунаро. науч.-техн. семинара «Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов». – Воронеж : ГОУ ВПО ВГЛТА, 2010. – С. 44-47.

42. Лыков, А. В. Явления переноса в капиллярно-пористых телах / А. В. Лыков. – Москва : Гостехиздат, 1954. – 296 с.

43. Цимерманис, Л.-Х. Б. Сорбция, структурообразование, массоперенос (термодинамика влажного тела) / Л.-Х. Б. Цимерманис. – Москва : Алекс, 2006. – 232 с. – ISBN 5-9618-0025-3.
44. Интенсификация процессов промывки с наложением ультразвуковых полей / М. К. Кошелева, А. А. Щёголев, С. Н. Шацких, М. С. Апалькова // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2012. – № 3 (339). – С. 113-117.
45. Кошелева, М. К. Повышение производственной и экологической безопасности отделочного производства тонкосуконных фабрик за счет совершенствования технологии / М. К. Кошелева // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2005. – № 2 (283). – С. 100-104.
46. Павлюкевич, Н. В. Введение в теорию тепло- и массопереноса в пористых средах / Н. В. Павлюкевич. – Минск : Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси, 2002. – 140 с.
47. Аксельруд, Г. А. Массообмен в системе твердое тело - жидкость / Г. А. Аксельруд. – Львов : Изд-во львовского ун-та, 1970. – 187 с.
48. Rudobashta, S. P. Mathematical Simulation of the Extraction of a Blending Agent from Cylindrical Bodies in the Semicontinuous Regime / S. P. Rudobashta, M. K. Kosheleva, É. M. Kartashov. – DOI 10.1007/s10891-016-1417-5 // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2016. – Vol. 89. – № 3. – P. 606-613.
49. Rudobashta, S. P. Modeling of the Extraction of a Target Component from Bodies of Spherical Shape in a Semicontinuous Process / S. P. Rudobashta, M. K. Koshelev, É. M. Kartashov. – DOI 10.1007/s10891-017-1628-4 // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2017. – Vol. 90. – № 4. – P. 797-805.
50. Rudobashta, S. P. Nonstationary Mass Transfer Near the Surface of a Cylindrical Body / S. P. Rudobashta, M. K. Kosheleva, É. M. Kartashov. – DOI 10.1007/s10891-015-1316-1 // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2015. – Vol. 88. – № 6. – P. 1320-1328.
51. Романков, П. Г. Экстрагирование из твердых материалов / П. Г. Романков,

М. И. Курочкина. – Ленинград : Химия, 1983. – 256 с.

52. Казуб, В. Т. Кинетика и основы аппаратного оформления процессов электроразрядного экстрагирования биологически активных соединений : специальность 05.17.08 «Процессы и аппараты химических технологий» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Казуб Валерий Тимофеевич ; Тамб. гос. техн. ун-т. – Тамбов, 2002. – 345 с.

53. Кошкарлова, А. Г. Интенсификация процессов экстрагирования целевых компонентов из растительного сырья импульсным электрическим полем высокой напряженности : специальность 05.17.08 «Процессы и аппараты химических технологий» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кошкарлова Анна Геннадьевна ; Тамб. гос. техн. ун-т. – Тамбов, 2018. – 155 с.

54. Moholkar, V. S. Mechanistic Aspects and Optimization of Ultrasonic Washing / V. S. Moholkar, M. M. Warmoeskerken // Aatcc Review. – 2002. – Vol. 2. – № 2. – P. 34-37.

55. Laundry process intensification by ultrasound / M. M. C. G. Warmoeskerken, P. Van Der Vlist, V. S. Moholkar, V. A. Nierstrasz. – DOI 10.1016/S0927-7757(02)00372-2 // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2002. – Vol. 210. – № 2-3. – P. 277-285.

56. Альтер-Песоцкий, Ф. Л. Физические методы интенсификации процессов крашения и отделки текстильных материалов [Текст] : Из цикла лекций заоч. фак. «Повышение эффективности пр-ва и улучшение качества продукции отделоч. пр-ва» / Ф. Л. Альтер-Песоцкий. – Москва : Лег. индустрия, 1979. – 70 с.

57. Промтов, М. А. Экстрагирование гуминовых и фульвовых кислот из гуматосо- держащего сырья в роторном импульсном аппарате : монография / М. А. Промтов, С. П. Рудобашта. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2022. – 124 с. – ISBN 978-5-8265-2544-9.

58. Moholkar, V. S. Intensification of Mass Transfer in Wet Textile Processes by Power Ultrasound / V. S. Moholkar, V. A. Nierstrasz, M. M. C. G. Warmoeskerken. – DOI 10.1515/aut-2003-030305 // AUTEX Research Journal. – 2003. – Vol. 3. – № 3. – P. 129-138.

59. Czaplicki, Z. Optimization of Scouring Alpaca Wool by Ultrasonic Technique / Z. Czaplicki, K. Ruszkowski. – DOI 10.1080/15440478.2013.864577 // Journal of Natural Fibers. – 2014. – Vol. 11. – № 2. – P. 169-183.

60. Ultrasonic scouring of wool and its effects on fibre breakage during carding / Q. Li, C. J. Hurren, C. Ding [et al.]. – DOI 10.1080/00405000.2010.531951 // The Journal of The Textile Institute. – 2011. – Vol. 102. – № 12. – P. 1059-1064.

61. Ultrasonic washing of textiles / J. Choi, T.-H. Kim, H.-Y. Kim, W. Kim. – DOI 10.1016/j.ultsonch.2015.07.018 // Ultrasonics Sonochemistry. – 2016. – Vol. 29. – P. 563-567.

62. Булекова, А. А. Повышение эффективности и расчет процесса промывки хлопчатобумажных тканей при использовании ультразвука : специальность 05.17.08 «Процессы и аппараты химических технологий»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Булекова Анна Александровна ; Моск. гос. текст. ун-т им. А.Н. Косыгина. – Москва, 2007. – 128 с.

63. Hassan, M. M. Ultrasound-assisted sustainable and energy efficient pre-treatments, dyeing, and finishing of textiles – A comprehensive review / M. M. Hassan, K. Saifullah. – DOI 10.1016/j.scp.2023.101109 // Sustainable Chemistry and Pharmacy. – 2023. – Vol. 33. – P. 101109.

64. Санжеева, Е. Б. Исследование возможности применения ультразвука при удалении белковых загрязнений с хлопчатобумажных тканей / Е. Б. Санжеева, Т. Е. Баланова, В. В. Сафонов // Молодежь-производству. – 2006. – С. 87-88.

65. Сафонов, В. В. Интенсификация химико-текстильных процессов отделочного производства: Учебное пособие / В. В. Сафонов. – Москва : МГТУ им. А.Н. Косыгина, 2006. – 405 с. – ISBN 5-8196-0078-9.

66. Промтов, М. А. Перспективы применения кавитационных технологий для интенсификации химико-технологических процессов / М. А. Промтов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2008. – Т. 14. – № 4. – С. 861-869.

67. Патент № SU 1060724 A1 СССР, МПК D06B 19/00. Способ обработки водного раствора для промывки хлопчатобумажных тканей : N 3309735: заявл.

30.06.1981 : опубл. 15.12.1983 / Давидзон М. И., Мальцева Т. Н. – 4 с.

68. Патент № RU 2163650 C1 Российская Федерация, МПК D06B 3/24, D06B 13/00. Способ жидкостной обработки шерстяных тканей : N 2000105192/12: заявл. 02.03.2000 : опубл. 27.02.2001 / Кошелева М. К., Щёголев А. А., Кочкина Н. Е., [и др.]. – 7 с. : ил.

69. Кошелева, М. К. Повышение производственной и экологической безопасности в химической технологии отделки при использовании магнитного поля для интенсификации процесса промывки тканей / М. К. Кошелева, Л. В. Гурьева, Т. А. Новикова // Наука как движущая антикризисная сила: инновационные преобразования, приоритетные направления и тенденции развития фундаментальных и прикладных научных исследований. – 2016. – С. 99-102.

70. Донских, Г. Н. Интенсификация процесса крашения шерстяных материалов путем активации водных сред : специальность 05.19.03 «технология текстильных материалов» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Донских Галина Николаевна ; МГТУ им. А.Н. Косыгина. – Москва, 1985. – 181 с.

71. Патент № RU 2763551 C1 Российская Федерация, МПК. Способ применения омагниченной воды при подготовке волокнистых материалов : N 2021104997: заявл. 26.02.2021 : опубл. 30.12.2021 / Нестеренко А. В., Филиппов Д. И., Филиппов А. Д., [и др.]. – 14 с. : D06B 1/00.

72. Циркина, О. Г. Теоретическое и экспериментальное обоснование повышения эффективности технологий отделки текстиля с использованием поля токов высокой частоты : специальность 05.19.02 «Технология и первичная обработка текстильных материалов и сырья» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Циркина Ольга Германовна ; Иван. гос. хим.-технол. ун-т. – Иваново, 2015. – 418 с.

73. Патент № RU 2692375 C1 Российская Федерация, МПК B01J 19/08, B01D 11/00. Устройство для получения экстракта из софоры японской : N 2018124418: заявл. 03.07.2018 : опубл. 24.06.2019 / Казуб В. Т., Кошкарлова А. Г., Толмачева А. К. – 7 с. : ил.

74. Казуб, В. Т. Интенсификация процессов экстрагирования импульсным электрическим полем высокой напряженности / В. Т. Казуб, А. Г. Кошкарлова // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2014. – Т. 20. – № 3. – С. 496-501.

75. Бабаев, М. Ш. Исследование некоторых массообменных процессов и аппаратов для интенсивной жидкостной обработки текстильных материалов с использованием высоковольтного разряда в жидкости : специальность №180 «Машины и оборудование легкой промышленности» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Бабаев Михаил Шолиахович ; Костромской технологический институт. – Москва, 1970. – 193 с.

76. Зубенко, А. А. Электроразрядная интенсификация процесса промывки шерсти / А. А. Зубенко // Электронная обработка материалов. – 2008. – № 3. – С. 92-93.

77. СарIBEKOBA, Ю. Г. Модификация шерстяных волокон электроразрядной нелинейной объемной кавитацией / Ю. Г. СарIBEKOBA, Ю. Г. СарIBEKOBA. – ФЛП Гринь ДС, 2015. – 187 с. – ISBN 617-7243-80-0.

78. Ермолаева, А. В. Разработка технологии очистки шерстяного волокна с применением электроразрядной нелинейной объемной кавитации : специальность 05.19.03 : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ермолаева Алена Васильевна ; . – Херсон, 2009. – 152 с.

79. СарIBEKOBA, Ю. Г. Применение электроразрядной нелинейной объемной кавитации в процессе очистки шерстяного волокна / Ю. Г. СарIBEKOBA // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2009. – Т. 4. – № 9 (40). – С. 43-46.

80. СарIBEKOBA, Ю. Г. Влияние электрогидравлического эффекта на поверхность волокна в процессе первичной подготовки шерсти / Ю. Г. СарIBEKOBA, А. В. Ермолаева // ВІСНИК. – 2007. – С. 2008160.

81. Исследование влияния высокоэнергетической дискретной обработки на кинетику экстракции и свойства шерстного жира / О. Я. Семешко, А. Н. Куник, Т. С. Асаулук [и др.] // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2016. – Т. 2. – № 6 (80). – С. 40-45.

82. Development of a two-step technology of scouring wool by the method of high-energy discrete treatment / O. Kunik, O. Semeshko, T. Asaulyuk [и др.] // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2016. – № 4 (10). – С. 36-43.

83. Мясников, С. А. Исследование влияния высоковольтных импульсных электрических разрядов на свойства хлопчатобумажного текстильного материала / С. А. Мясников, О. Я. Семешко // Вестник Херсонского национального технического университета. – 2016. – № 1 (56). – С. 108-112.

84. Исследования кинетики удаления нецеллюлозных веществ из льноволокна воздействием электроразрядной кавитации / А. П. Малюшевская, Г. С. Сарибекон, Л. А. Петриченко [и др.] // Электронная обработка материалов. – 2004. – № 5. – С. 54-59.

85. Pulsed electrohydraulic discharge for wool fiber cleaning / Y. Zhang, G. Pang, Y. Zhao [et al.]. – DOI 10.1016/j.jclepro.2015.08.023 // Journal of Cleaner Production. – 2016. – Vol. 112. – P. 1033-1039.

86. Nourbakhsh, S. Effect of corona discharge treatment on indigo dyed cotton fabric / S. Nourbakhsh, M. E. Yazdanshenas. – DOI 10.1111/j.1478-4408.2007.00119.x // Coloration Technology. – 2008. – Vol. 124. – № 1. – P. 43-47.

87. Смирнов, В. И. Электроактивация промывного раствора как средство интенсификации процесса промывки тканей / В. И. Смирнов, Н. Ф. Калабин, С. Л. Халезов // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2008. – № 2. – С. 113-115.

88. Евтеева, Н. Г. Технология производства кож для верха обуви с использованием электроактивированных растворов / Н. Г. Евтеева // Научное издание. – 2024. – Т. 20. – С. 59.

89. Евтеева, Н. Г. Получение электроактивированных водных растворов хлорида натрия / Н. Г. Евтеева, О. В. Дормидонтова, В. И. Чурсин // Фундаментальные и прикладные научные исследования в области инклюзивного дизайна и технологий: опыт, практика и перспективы. – 2021. – С. 110.

90. Евтеева, Н. Г. Влияние режимов электрохимической активации водных растворов солей на свойства католита и анолита / Н. Г. Евтеева,

О. В. Дормидонтова, В. И. Чурсин // Сборник трудов Международной научной студенческой конференции «Инновационное развитие легкой и текстильной промышленности»(ИНТЕКС-2019). – Москва : ФГБОУ ВО «РГУ им. А. Н. Косыгина», 2019. – С. 97-101.

91. Бахир, В. М. Электрохимическая активация: изобретения, техника, технология / В. М. Бахир. – Москва : Вива – Стар, 2014. – 511 с. – ISBN 978-5-9904688-3-2.

92. Обоснование выбора поверхностно-активных веществ для интенсификации процесса промывки текстильных материалов / И. А. Муравьев, М. Н. Кротова, Е. Ю. Куваева, О. И. Одинцова // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. – 2012. – Т. 55. – № 9. – С. 63-65.

93. Кузнецов, В. Б. Научные основы совершенствования технологических процессов промывки и художественно-колористического оформления тканей : специальность 05.19.02 «Технология и первичная обработка текстильных материалов и сырья»: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Кузнецов Виктор Борисович ; Ивановский государственный химико-технологический университет. – Иваново, 2004. – 294 с.

94. Emulsion Liquid Membrane for Textile Dyes Removal: Extraction Process / A. Kusumastuti, S. Anis, Universitas Negeri Semarang, Indonesia [et al.]. – DOI 10.21315/jps2018.29.s2.13 // Journal of Physical Science. – 2018. – Vol. 29. – Emulsion Liquid Membrane for Textile Dyes Removal. – № Supp. 2. – P. 175-184.

95. Азанова, А. А. Плазменная обработка как способ очистки поверхности хлопкового волокна / А. А. Азанова // Сборник научных трудов Международной научной конференции, посвященной 110-летию со дня рождения профессора А.Г. Севостьянова. Часть 2. – 2020. – С. 17-22.

96. Совершенствование технологии промывки текстильных материалов, колорированных активными красителями / О. И. Одинцова, М. Н. Кротова, Е. Ю. Куваева, Е. И. Титова // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2009. – № 3 (316). – С. 42-46.

97. Проблемы выбора текстильных вспомогательных веществ для процессов

подготовки и промывки текстильных материалов / О. И. Одинцова, О. К. Смирнова, М. Н. Кротова, Б. Н. Мельникова // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2009. – № 2 (314). – С. 46-49.

98. Одинцова, О. И. Микрокапсулирование биологически активных веществ и их использование для функционализации текстильных материалов / О. И. Одинцова, Л. С. Петрова, О. В. Козлова // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2018. – № 4 (376). – С. 85-89.

99. Анушервони, Ш. Использование ПАВ в процессах промывки натуральных тканей колорированных активными красителями / Ш. Анушервони, О. И. Одинцова // Сборник материалов VI Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Химические проблемы современности 2022». – Донецкий национальный университет, 2022. – С. 263-266.

100. Муравьев, И. А. Оптимизация процесса промывки текстильных материалов / И. А. Муравьев, М. Н. Кротова, О. И. Одинцова // Сборник научных трудов 5-й Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Экологические проблемы промышленных городов». – Саратов : Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 2011. – С. 232-232.

101. Мельников, Б. Н. Прогресс текстильной химии за 50 лет / Б. Н. Мельников // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2007. – № 6. – С. 303.

102. Madhu, A. Developments in application of enzymes for textile processing / A. Madhu, J. N. Chakraborty. – DOI 10.1016/j.jclepro.2017.01.013 // Journal of Cleaner Production. – 2017. – Vol. 145. – P. 114-133.

103. Bioscouring of Cotton Fabrics using Pectinase Enzyme its Optimization and Comparison with Conventional Scouring Process / R. Rajendran, S. Karthik Su, R. Radhai, P. Rajapriya. – DOI 10.3923/pjbs.2011.519.525 // Pakistan Journal of Biological Sciences. – 2011. – Т. 14. – № 9. – С. 519-525.

104. Чешкова, А. В. Ферментативная модификация природных волокнообразующих полимеров на различных стадиях подготовки текстильных

материалов : специальность 05.19.02 «Технология и первичная обработка текстильных материалов и сырья»: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Чешкова Анна Владимировна ; Ивановский государственный химико-технологический университет. – Иваново, 2005. – 545 с.

105. Патент № RU 2146735 C1 Российская Федерация, D06L 1/16. Способ многостадийной промывки напечатанных целлюлозосодержащих тканей : N 98114119/04: заявл. 08.07.1998 : опубл. 20.03.2000 / Лебедева В. И., Чешкова А. В., Субботин В. Г., [и др.]. – 6 с.

106. Технологии ферментной котонизации для получения волокон льна с фунгистатическими свойствами / В. А. Логинова, А. В. Чешкова, С. Ю. Шибашова, И. М. Захарова // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. – 2013. – Т. 19. – № 1. – С. 44-47.

107. Процессы и аппараты химической технологии / А. А. Захарова, Л. Т. Бахшиева, Б. П. Кондауров, [и др.] / Под ред. А.А. Захаровой. – Москва : Academia, 2006. – 521 с. – ISBN 5-7695-1723-9.

108. Роль кавитации и пульсирующей парогазовой полости в процессах электроразрядного измельчения растительного сырья / В. Т. Казуб, Ю. Н. Кудимов, С. П. Рудобашта, А. Г. Борисов // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2004. – № 9. – С. 21-23.

109. Рудобашта, С. П. Электроразрядное экстрагирование целевых компонентов из растительного сырья / С. П. Рудобашта, В. Т. Казуб, А. Г. Борисов // Промышленная теплотехника. – 2007. – Т. 9. – № 7. – С. 206-211.

110. Рудобашта, С. П. Кинетика массообмена при электроразрядном экстрагировании / С. П. Рудобашта, В. Т. Казуб, А. Г. Борисов // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2005. – Т. 6. – С. 31-33.

111. Рудобашта, С. П. Влияние режимных параметров процесса на кинетику электроразрядного экстрагирования целевого компонента из растительного сырья / С. П. Рудобашта, В. Т. Казуб, А. Г. Борисов // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2005. – Т. 12. – С. 27-30.

112. Оробинская, В. Н. Кинетика и технология электроразрядного

экстрагирования биологически активных соединений из органического сырья : специальность 05.17.08 «Процессы и аппараты химических технологий» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Оробинская Валерия Николаевна ; Тамб. гос. техн. ун-т. – Тамбов, 2012.

113. Математическое описание интенсифицированных процессов экстрагирования технологических загрязнений из плоских волокнистых материалов / М. К. Кошелева, А. П. Булеков, В. Т. Казуб, М. З. Цинцадзе. – DOI 10.37816/2713-0789-2021-1-1-28-36 // Промышленные процессы и технологии. – 2021. – Т. 1. – № 1. – С. 28-36.

114. Рудобашта, С. П. Диффузия в химико-технологических процессах / С. П. Рудобашта, Э. М. Карташов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : КолосС, 2010. – 477 с. – ISBN 978-5-9532-0714-0.

115. Peng, C. The Study of Fabric Drying Using Direct-Contact Ultrasonic Vibration / C. Peng, S. Moghaddam. – Text : electronic // Current Drying Processes. – IntechOpen, 2020. – URL: <https://www.intechopen.com/books/current-drying-processes/the-study-of-fabric-drying-using-direct-contact-ultrasonic-vibration> (date accessed: 04.06.2024).

116. Investigating of drying kinetics and mathematical modeling of turnip / P. Gharehbeiglou, B. Askari, A. H. Rad [и др.] // Agricultural Engineering International: CIGR Journal. – 2014. – Т. 16. – № 3. – С. 194-204.

117. Сажин, Б. С. Сушка и промывка текстильных материалов: теория, расчет процессов / Б. С. Сажин, В. А. Реутский. – Москва : Легпромбытиздат, 1990. – 224 с.

118. Аппроксимация изотерм сорбции волокнистых материалов различными уравнениями / М. К. Кошелева, О. Р. Дорняк, Т. А. Новикова, М. З. Цинцадзе // Химические волокна. – 2019. – № 4. – С. 53-55.

119. Approximation of Sorption Isotherms of Fiber Materials by Various Equations / М. К. Kosheleva, О. R. Dornyak, Т. A. Novikova, М. Z. Tsintsadze. – DOI 10.1007/s10692-020-10092-y // Fibre Chemistry. – 2019. – Vol. 51. – № 4. – P. 268-271.

120. Корнюхин, И. П. Уравнения сорбционного равновесия текстильных материалов в широком диапазоне изменения температуры и влажности воздуха /

И. П. Корнюхин, Л. И. Жмакии, Л. И. Козырева // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2000. – № 6. – С. 84-90.

121. Henderson, S. M. A basic concept of equilibrium moisture / S. M. Henderson // Agric. Eng. – 1952. – Vol. 32. – № 1. – P. 29-32.

122. Горобцова, Н. Е. Метод описания и расчета изотерм сорбции-десорбции, общий для различных материалов / Н. Е. Горобцова // Тепломассообмен-VI. Материалы VI Всесоюзной конференции по тепломассообмену. – Минск : ИТМО им. А.В. Лыкова АН БССР, 1980. – Т. 7. – С. 60-63.

123. Kosheleva, M. K. Structural, Adsorption, and Mass-Transfer Properties of Polycapromide / M. K. Kosheleva, S. P. Rudobashta, T. A. Novikova. – DOI 10.1007/s10692-016-9695-4 // Fibre Chemistry. – 2016. – Vol. 47. – № 5. – P. 372-376.

124. Кошелева, М. К. Интенсификация и расчет процесса экстрагирования гидроксида натрия из волокнистых материалов / М. К. Кошелева, В. Т. Казуб, М. З. Цинцадзе // Хим. волокна. – 2021. – № 6. – С. 18-21.

125. Kosheleva, M. The analysis of the properties of nonwoven material as the object of technological processing during drying / M. Kosheleva // V Международная конференция-школа по химической технологии ХТ'16. – 2016. – С. 147-148.

126. Щеголев, А. А. Разработка обобщенного метода расчета процесса промывки хлопчатобумажных тканей в высокоскоростных промывных машинах : специальность 05.17.08 Процессы и аппараты химических технологий : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Щеголев Андрей Александрович ; . – Москва, 1982. – 256 с.

127. Кошелева, М. К. Равновесие в системе «волокнистый материал - раствор гидроксида натрия» / М. К. Кошелева, М. З. Цинцадзе, О. Р. Дорняк. – DOI 10.17277/vestnik.2024.03.pp.456-461 // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2024. – Т. 30. – № 3. – С. 456-461.

128. Ахназарова, С. Л. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии: Учеб. пособие для хим.-технол. спец. вузов. / С. Л. Ахназарова, В. В. Кафаров. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Высш. шк., 1985. – 327 с.

129. Шарло, Г. Методы аналитической химии. Количественный анализ

неорганических соединений / Г. Шарло / Перевод с французского, дополнения и общая редакция проф. Ю.Ю. Лурье. – Москва : Химия, 1965. – 977 с.

130. ГОСТ 3813-72 (ИСО 5081-77, ИСО 5082-82). Материалы текстильные. Ткани и штучные изделия. Методы определения разрывных характеристик при растяжении : межгосударственный стандарт : разработан и внесен Госкомлегпромом при Госплане СССР : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 01.03.72 N 486 // Электронный фонд нормативно-технической и нормативно-правовой информации Консорциума «Кодекс» [сайт]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200018461>. – URL: (дата обращения: 15.09.2022). – Текст : электронный.

131. Текстильное материаловедение: лабораторный практикум / Ю. С. Шустов, С. М. Кирюхин, А. Ф. Давыдов, [и др.]. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : ИНФРА-М, 2016. – 339 с. – ISBN 978-5-16-011720-1.

132. Рудобашта, С. П. Водное экстрагирование сырья под воздействием импульсного электрического поля высокой напряженности / С. П. Рудобашта, В. Т. Казуб, А. Г. Кошкарлова // Агроинженерия. – 2016. – № 4 (74). – С. 16-21.

133. Актуальные вопросы и векторы развития современной науки и технологий : монография / Д. В. Андрющенко, С. Н. Бекиров, Э. Ш. Бекирова, [и др.]. – Петрозаводск : МЦНП «Новая наука», 2022. – 397 с. – ISBN 978-5-00174-594-5.

134. Казуб, В. Т. Некоторые особенности интенсифицирующего воздействия физических полей на процесс экстрагирования / В. Т. Казуб, М. К. Кошелева, М. З. Цинцадзе // Сборник материалов Всероссийской научной конференции молодых исследователей с международным участием «Инновационное развитие техники и технологий в промышленности (ИНТЕКС-2023)». Часть 3. – Москва : ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина», 2023. – С. 257-260.

135. Казуб, В. Т. Особенности интенсифицирующего воздействия физических полей на процесс экстрагирования / В. Т. Казуб, М. К. Кошелева, М. З. Цинцадзе // Современные энергосберегающие тепловые и массообменные

технологии (суш- ка, тепловые и массообменные процессы): сборник научных трудов Восьмой Меж- дународной научно-практической конференции (17–19 октября 2023 года). – Москва : ООО «Мегаполис», 2023. – С. 150-152.

136. Громаков, Н. С. Поверхностное натяжение растворов: Методические указания по коллоидной химии для студентов дневной и заочной форм обучения / Н. С. Громаков. – Казань : Изд-во Казанск. гос. архитект.-строит. ун-та, 2017. – 19 с.

137. Казуб, В. Т. Определение скорости продвижения фронта экстрагента в растительный материал при его набухании / В. Т. Казуб, А. Г. Кошкарлова // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2014. – Т. 20. – № 4. – С. 773-779.

138. Малюшевская, А. К механизму электроразрядной интенсификации процессов очистки растительных волокон от нецеллюлозных веществ. Часть 1.(Технологическая среда. Постановка задачи. Методика исследований) / А. Малюшевская, П. Малюшевский // Электронная обработка материалов. – 2016. – Т. 52. – № 3. – С. 40-46.

139. Асаулюк, Т. Механизм воздействия электрогидравлического эффекта на шерстяное волокно в процессе его модификации / Т. Асаулюк, О. Семешко, Ю. Сарибекова // Вестник Херсонского национального технического университета. – 2017. – № 1 (60). – С. 86-91.

140. Ушаков, В. Я. Импульсный электрический пробой жидкостей / В. Я. Ушаков. – Томск : Издательство Томского университета, 1975. – 256 с.

141. Влияние электрических разрядов на кинетические коэффициенты в процессе промывки хлопчатобумажной ткани / М. К. Кошелева, С. П. Рудобашта, В. Т. Казуб, М. З. Цинцадзе // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2020. – № 1(385). – С. 166-171.

142. Kosheleva, M. K. The influence of physical fields on kinetic coefficients in the process of extracting contaminants from fabric / M. K. Kosheleva, M. Z. Tsintsadze. – DOI 10.17277/vestnik.2020.02.pp.254-261 // Transactions TSTU. – 2020. – Vol. 26. – № 2. – P. 254-261.

143. Influence of Physical Fields on Extraction of Sodium Hydroxide from

Cellulose Fibrous Materials / M. K. Kosheleva, O. R. Dornyak, M. Z. Tsintsadze [et al.]. – DOI 10.1007/s10692-024-10490-6 // Fibre Chemistry. – 2024. – Vol. 55. – № 6. – P. 356-358.

144. Патент № RU 2788462 C2 Российская Федерация, МПК D06C 7/00. Способ и устройство для отделки хлопчатобумажных тканей различной плотности воздействием импульсных электрических разрядов : N 2021106403: заявл. 11.03.2021 : опубл. 19.01.2023 / Казуб В. Т., Кошелева М. К., Рудобашта С. П., [и др.]. – 9 с. : ил.

145. Патент № RU 2311504 C1 Российская Федерация, МПК D06B 19/00. Способ обработки водного раствора для промывки тканей : N 2006110599/12: заявл. 04.04.2006 : опубл. 27.11.2007 / Кошелева М. К., Щеголев А. А., Кереметин П. П., Елданди А. Э. – 4 с.

146. Классен, В. И. Омагничивание водных систем / В. И. Классен. – Москва : Химия, 1978. – 238 с.

147. Патент № RU 95676 U1 Российская Федерация, МПК D06B 3/20, D06M 10/00. Устройство для промывки движущейся ткани : N 2010104942/22: заявл. 12.02.2010 : опубл. 10.07.2010 / Кошелева М. К., Булеков А. П., Щеголев А. А., [и др.]. – 9 с. : ил.

148. Патент № RU 2100501 C1 Российская Федерация, МПК D06B 3/24. Способ жидкостной обработки шерстяных тканей после крашения : N 96113777/12: заявл. 05.07.1996 : опубл. 27.12.1997 / Кошелева М. К., Сучков А. Ф., Реутский В. А. – 7 с.

149. Патент № RU 118639 U1 Российская Федерация, МПК D06B 3/24. Устройство промывки текстильных материалов в жгуте : N 2012108908/12: заявл. 11.03.2012 : опубл. 27.07.2012 / Кошелева М. К., Рудобашта С. П., Шацких С. Н., Величко И. В. – 10 с. : ил.

150. Исследование кинетики процесса промывки тонкосуконных шерстяных тканей и выбор технологического режима их промывки / М. Кошелева, А. Щеголев, С. Шацких [и др.] // Успехи в химии и химической технологии. – 2011. – Т. 25. – № 11 (127). – С. 88-92.

151. Девисилов, В. А. Охрана труда / В. А. Девисилов. – 3-е, испр. и доп. – Москва : Форум : ИНФРА-М, 2007. – 445 с. – ISBN 978-5-91134-111-4.

152. Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок : [утверждены приказом Минтруда России от 15.12.2020 N 903н (ред. от 29.04.2022) «Об утверждении Правил по охране труда при эксплуатации электроустановок» (Зарегистрировано в Минюсте России 30.12.2020 N 61957)]. // Электронный фонд нормативно-технической и нормативно-правовой информации Консорциума «Кодекс» [сайт]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/573264184>. – URL: (дата обращения: 01.09.2024). – Текст : электронный.

153. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей электрической энергии : [утверждены приказом Минэнерго России от 12 августа 2022 года N 811: Зарегистрировано в Министерстве юстиции Российской Федерации 7 октября 2022 года, регистрационный N 70433] // Электронный фонд нормативно-технической и нормативно-правовой информации Консорциума «Кодекс» [сайт]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/351621634?marker=65E0IS>. – URL: (дата обращения: 01.09.2024). – Текст : электронный.

154. Основы безопасности жизнедеятельности: учебное пособие для студентов высших учебных заведений / Е. А. Крамер-Агеев, В. В. Костерев, И. К. Леденев, [и др.] / Под общей ред. И.К. Леденева. – Москва : МИФИ, 2007. – 320 с. – ISBN 978-5-7262-0847-3.

155. Правила применения и испытания средств защиты, используемых в электроустановках, технические требования к ним : [РАЗРАБОТАНЫ СКТБ ВКТ МОСЭНЕРГО при участии специалистов Минтопэнерго РФ] // Электронный фонд нормативно-технической и нормативно-правовой информации Консорциума «Кодекс» [сайт]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200003243>. – URL: (дата обращения: 01.09.2024). – Текст : электронный.

156. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 06.04.2024) : [Принят Государственной Думой 21 декабря 2001 года : одобрен Советом Федерации 26 декабря 2001 года // Электронный фонд нормативно-технической и нормативно-правовой информации Консорциума «Кодекс» [сайт]. –

URL: <https://docs.cntd.ru/document/901807664>. – URL: (дата обращения: 01.09.2024).
– Текст : электронный.

157. Фаерман, В. Т. Применение ультразвука для обработки текстильных материалов / В. Т. Фаерман. – Москва : Легкая индустрия, 1969. – 139 с.

158. Tsintsadze, M. Z. Improving the environmental and economic efficiency of the process of sodium hydroxide extraction from cotton fabrics by improving the technological regime / M. Z. Tsintsadze // Industrial processes and technology. – 2024. – Т. 4. – № 4 (14). – С. 15-22.

159. Федеральный закон «Об охране окружающей среды» от 10.01.2002 N 7-ФЗ (редакция, действующая с 1 сентября 2024 года): принят Государственной Думой 20 декабря 2001 года : одобрен Советом Федерации 26 декабря 2001 года // Электронный фонд нормативно-технической и нормативно-правовой информации Консорциума «Кодекс» [сайт]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/901808297>. – URL: (дата обращения: 09.09.2024). – Текст : электронный.

160. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 20 октября 2023 года N 2909-р [Об утверждении перечня загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды] (с изменениями на 23 декабря 2023 года): утвержден распоряжением Правительства Российской Федерации от 20 октября 2023 года N 2909-р. // Электронный фонд нормативно-технической и нормативно-правовой информации Консорциума «Кодекс» [сайт]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1303478770>. – URL: (дата обращения: 01.09.2024). – Текст : электронный.

161. Постановление правительства №881 от 31.05.2023 Об утверждении Правил исчисления и взимания платы за негативное воздействие на окружающую среду и о признании утратившими силу некоторых актов Правительства Российской Федерации и отдельного положения акта Правительства Российской Федерации // Электронный фонд нормативно-технической и нормативно-правовой информации Консорциума «Кодекс» [сайт]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1301711201>. – URL: (дата обращения: 09.04.2024). –

Текст : электронный.

162. Постановление правительства №913 от 13.09.2016 О ставках платы за негативное воздействие на окружающую среду и дополнительных коэффициентах (с изменениями на 24 января 2020 года) // Электронный фонд нормативно-технической и нормативно-правовой информации Консорциума «Кодекс» [сайт]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/420375216>. – URL: (дата обращения: 09.04.2024). – Текст : электронный.

163. Постановление Правительства РФ от 20.03.2023 N 437 «О применении в 2023 году ставок платы за негативное воздействие на окружающую среду» // Электронный фонд нормативно-технической и нормативно-правовой информации Консорциума «Кодекс» [сайт]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1301123381>. – URL: (дата обращения: 09.04.2024). – Текст : электронный.

164. Постановление Правительства РФ от 31.12.2020 N 2398 (ред. от 07.10.2021) «Об утверждении критериев отнесения объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, к объектам I, II, III и IV категорий» // Электронный фонд нормативно-технической и нормативно-правовой информации Консорциума «Кодекс» [сайт]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/573292854>. – URL: (дата обращения: 09.04.2024). – Текст : электронный.

165. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 39-2023 производство текстильных изделий (промывка, отбеливание, мерсеризация, крашение текстильных волокон, отбеливание, крашение текстильной продукции) : утвержден приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт) от 19 декабря 2023 г. // Бюро наилучших доступных технологий [сайт]. – URL: https://burondt.ru/NDT/NDTDocsDetail.php?UrlId=2098&etkstructure_id=1872. – URL: (дата обращения: 02.09.2024). – Текст : электронный.

УТВЕРЖДАЮГенеральный директор
фирмы ООО "ЭСМ"

Бачиев И.С.

2024 г.

АКТ

об использовании результатов научно-исследовательской работы на тему
«Повышение эффективности и расчет процесса промывки текстильных
материалов при использовании физических полей, в частности
электрического импульсного разряда»

В РГУ имени А.Н. Косыгина профессором кафедры энергоресурсоэффективных технологий, промышленной экологии и безопасности М.К. Кошелевой и аспирантом этой же кафедры М.З. Цинцадзе совместно с профессором Пятигорского медико-фармацевтического института В.Т. Казуб разработан способ повышения энергоресурсоэффективности и экологической безопасности процесса экстрагирования целевых компонентов из волокнистых целлюлозных материалов под действием импульсного электрического поля.

Способ защищён патентом РФ.

Использование импульсных воздействий относится к перспективным технологиям, направленным на повышение энергоэффективности и ресурсоэффективности, что отмечается в информационно-техническом справочнике по наилучшим доступным технологиям ИТС39-2023, утверждённом Росстандартом.

Результаты научно-исследовательской работы используются в промышленных условиях ООО "ЭСМ" для повышения энергоресурсоэффективности и расчёта процесса экстрагирования целевых компонентов из растительного сырья.



Зам. генерального директора
по общим вопросам

Власов А.И.

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
АО «НТЦ Промышленная безопасность»

Котельников В.С.
«» 2025 г.
АКТ

об использовании результатов научно-исследовательской работы на тему
«Оценка эффективности промывки текстильных материалов,
интенсифицированной импульсным электрическим полем»

Профессор кафедры энергоресурсоэффективных технологий, промышленной экологии и безопасности РГУ им. А.Н. Косыгина Кошелева М.К. и аспирант этой же кафедры Цинцадзе М.З. совместно с профессором Пятигорского медико-фармацевтического института Казубом В.Т. разработали защищенный патентом РФ способ повышения энергоресурсоэффективности и экологической безопасности процесса промывки хлопчатобумажных тканей от гидроксида натрия с использованием импульсного электрического поля.

Данный способ интенсификации процесса промывки относится к перспективным технологиям, что находит отражение в научно-техническом справочнике по наилучшим доступным технологиям ИТС 39-2023.

Результаты научно-исследовательской работы используются в рамках деятельности АО «НТЦ Промышленная безопасность» при совершенствовании нормативно-технической базы в области экологической безопасности при использовании инновационных технологий в промышленных технологических процессах.

Заместитель генерального директора



Сулима Б.Б.



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Бийский технологический институт (филиал)
 федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
 высшего образования
 «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»
 ул. имени Героя Советского Союза Трофимова, 27, г. Бийск, 659305
 тел. (3854) 435322
 E-mail: info@bti.secna.ru

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор БТИ АлтГТУ

д.т.н., доцент

А.В. Шалунов



«08» 07 2025 г.

Акт

**об использовании результатов научно-исследовательской работы на
 тему «Повышение экологичности и ресурсоэффективности процесса
 промывки текстильных материалов при использовании импульсного
 электрического поля»**

В РГУ имени А.Н. Косыгина профессором кафедры энергоресурсоэффективных технологий, промышленной экологии и безопасности М.К. Кошелевой и аспирантом этой же кафедры М.З. Цинцадзе разработан защищённый патентом РФ способ повышения ресурсоэффективности и экологичности процесса экстрагирования (промывки) щёлочи из хлопчатобумажных тканей под действием импульсного электрического поля.

При разработке оборудования для интенсификации массообменных процессов импульсным электрическим полем, в том числе для волокнистых материалов, представляет практический интерес математическая модель, учитывающая влияние интенсифицирующего импульсного воздействия на кинетику гетерогенного массообменного процесса промывки, и предложенная интегральная оценка степени интенсификации процесса с использованием кинетических коэффициентов массоотдачи и массопроводности.

В.н.с. БТИ АлтГТУ, д.т.н.

Голых Р.Н.

«УТВЕРЖДАЮ»

Первый проректор – проректор

По образовательной деятельности

ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина»

Демболов С.Г.

«26»

2025

АКТ

Внедрения в учебный процесс результатов диссертационной работы на тему
«Повышение и оценка эффективности процесса промывки
хлопчатобумажных тканей с воздействием импульсного электрического
поля» Цинцадзе Марины Зиевны

Мы, нижеподписавшиеся, Бычкова И.Н. и Седляров О.И. составили настоящий акт о том, что полученные в диссертационной работе Цинцадзе М.З. «Повышение и оценка эффективности процесса промывки хлопчатобумажных тканей с воздействием импульсного электрического поля» данные по кинетике сорбции гидроксида натрия целлюлозным материалом используются при проведении курсового проектирования и практических занятий по курсу «Основные процессы и техника защиты окружающей среды» направления подготовки 20.03.01 Техносферная безопасность.

Директор института
химических технологий и
промышленной экологии,
к.т.н., доцент

Заведующий кафедрой
энергоресурсоэффективных
технологий,
промышленной экологии и
безопасности, д.т.н., доцент

И.Н. Бычкова

О.И. Седляров