

**КЛЮШКИН ИВАН ВЛАДИМИРОВИЧ**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ В ЗОНЕ ФОРМОВАНИЯ  
БУМАГОДЕЛАТЕЛЬНЫХ МАШИН С УЧЕТОМ ВАРИАБЕЛЬНОСТИ  
СВОЙСТВ БУМАЖНОЙ МАССЫ**

05.21.03 – технология и оборудование химической переработки биомассы дерева;  
химия древесины

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2022

Работа выполнена на кафедре машин автоматизированных систем ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна»

- Научный руководитель:** **Александрова Татьяна Николаевна**, доктор технических наук, профессор, профессор машин автоматизированных систем, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна»
- Официальные оппоненты:** **Алашкевич Юрий Давыдович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры машин и аппаратов промышленных технологий федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева»
- Дернова Елена Валентиновна**, кандидат технических наук, доцент, заместитель генерального директора по научно-технологическим вопросам Общества с ограниченной ответственностью «Управляющая компания «Объединенные бумажные фабрики»
- Ведущая организация:** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова»

Защита диссертации состоится 16 сентября 2022 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.236.08 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», по адресу: 198095, г. Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных д. 4. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна» по адресу: 198095, г. Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных д. 4., <http://sutd.ru>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 198095, г. Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных д. 4. В отзыве указываются фамилия, имя, отчество, почтовый адрес, телефон и адрес электронной почты (при наличии), наименование организации и должность лица с указанием структурного подразделения, представившего отзыв (п. 28 положения о присуждении ученых степеней).

Автореферат разослан: \_\_\_\_\_ 2022 года

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор технических наук

Махотина Людмила Герцевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Бумагоделательные машины (БДМ) – основной агрегат на целлюлозно-бумажных предприятиях. На этих машинах из водноволокнистой суспензии получают бумагу путем осуществления комплекса технологических процессов, среди которых одним из главных является процесс обезвоживания в сеточной части. На этой части происходит обезвоживание бумажной массы. В зависимости от вида обезвоживающих элементов также меняется волокнистая структура, возникающая при напуске бумажной массы на сетку. Волокна имеют форму гибких подвижных нитей. В зоне напуска развиваются течения, приводящие к ориентации волокон вдоль хода сетки и к образованию слоистой структуры. Ориентация волокон вдоль хода сетки определяет свойства полотна бумаги. Структура бумажного полотна на сетках оказывает значительное влияние, как на ход обезвоживания, так и на структуру получаемого при этом полотна и отсюда на качество готовой продукции.

Исследованию обезвоживающей способности бумагоделательных машин в зоне формования бумажного полотна посвящено большое количество научных трудов. В нашей стране интерес к разработке таких методов расчета, в частности, вызван ещё и недостаточными возможностями по чисто экспериментальному определению обезвоживающей способности создаваемых сеточных частей на стадии проектирования. В России уже проведена большая работа по разработке методов расчета обезвоживания в зоне формования. Были получены результаты по достаточно хорошему соответствию во многих случаях данных расчета обезвоживания в зоне формования экспериментальным данным. Развитие теории обезвоживания и разработка методики поэлементного расчета в зоне формования с учетом вариабельности свойств бумажной массы, является актуальной задачей.

При предварительном определении обезвоживающей способности создаваемых или модернизируемых сеточных частей бумагоделательных машин на стадии их разработки чисто экспериментальное её определение обычно трудоёмко и связано с большой затратой времени и средств. Поэтому использование методов математического моделирования может существенно облегчить ход проектирования и модернизации.

С началом применения различных химикатов, в том числе для изменения свойств бумажной массы и повышения качества вырабатываемой продукции, всего этого оказывается недостаточно для расчетного прогнозирования обезвоживающей способности таких сеточных частей. В настоящее время требуется дальнейшая разработка указанных расчетных методов с целью учета влияния химикатов на свойства бумажной массы. Дальнейшее развитие методов поэлементного расчёта обезвоживания с учетом изменения свойств бумажной массы в зоне формования позволит прогнозировать ход обезвоживания на проектируемых и модернизируемых действующих бумагоделательных машинах.

Чем быстрее движется сетка, тем меньше есть времени для отвода воды из бумажной массы на ней. Скорость процесса обезвоживания определяет скорость сетки. Обезвоживание в зоне формования БДМ имеет большое экономическое значение, так как отвод воды через сетку дешевле, чем в прессовой или сушильной частях.

Поскольку бумажная масса - это коллоидная система с растворенными в жидкости веществами, достижение баланса действующих в ней сил сопровождается обратимыми процессами физической адсорбции частиц на поверхности волокна. При использовании химикатов необходимо понимать их механизмы действия и комплексные эффекты влияния на поведение волокнистых полуфабрикатов для достижения поставленных задач, в том числе при изменении свойств бумажной массы.

Собранные и обработанные данные с ряда целлюлозно-бумажных предприятий, на которых применяются или применялись ранее химикаты фирмы «BASF SE» (Германия) для улучшения свойств бумажной массы, позволили усовершенствовать в данной работе методику поэлементного расчета обезвоживания.

Целью диссертации является развитие теории и разработка методики поэлементного расчета обезвоживания в зоне формования с учетом вариабельности свойств бумажной массы на бумагоделательных машинах с использованием математического моделирования.

**Для достижения поставленной цели нужно решить следующие задачи:**

1. Анализ источников литературы, в которых исследуется обезвоживание бумажной массы в том числе в зоне формования БДМ с использованием математического моделирования.

2. Развитие теории и разработка методики проведения расчета обезвоживания бумажной массы в зоне формования бумагоделательных машин.

3. Определение коэффициентов фильтрации на приборах по разным методикам, как без химикатов, улучшающих свойства бумажной массы так и с ними.

4. Экспериментально на действующих бумагоделательных машинах проверить предложенную методику расчета обезвоживания с учетом применения химикатов, улучшающих свойства бумажной массы в оптимальных технологических режимах их работы.

5. Разработка методики поэлементного расчета обезвоживания в зоне формования с учетом вариабельности свойств бумажной массы с использованием математического моделирования на примере бумагоделательных машин по выработке печатных видов бумаги.

**Научная новизна.** Теоретически и экспериментально обоснована методика поэлементного расчета обезвоживания в зоне формования с учетом вариабельности свойств бумажной массы с использованием математического

моделирования в оптимальных технологических режимах работы бумагоделательных машин для производства печатных видов бумаги.

**Теоретическая и практическая значимость** заключается в развитии теории и разработке методики поэлементного расчета обезвоживания в зоне формования с учетом вариабельности свойств бумажной массы на бумагоделательных машинах с использованием математического моделирования. Разработанная методика позволит подбирать оптимальные конструкции зон формования сеточных частей с точки зрения их обезвоживающей способности. Предложенная методика расчета применяется на производстве, что подтверждено актом внедрения.

**Объект исследований** – бумажная масса в зоне формования на бумагоделательных машинах на примере производства печатных видов бумаги.

**Предмет исследований** – методика поэлементного расчета обезвоживания в зоне формования на плоскосеточных БДМ с учетом вариабельности свойств бумажной массы и подбор оптимальных конструкции сеточных частей.

**Методы исследования.** Для проведения поэлементного расчета обезвоживания в зоне формования с учетом вариабельности свойств бумажной массы был произведен программный расчет с использованием математического моделирования. Коэффициенты фильтрации бумажных масс определялись на лабораторных приборах, а также были использованы данные полученные с действующих промышленных бумагоделательных машин. Достоверность результатов обеспечена многократным проведением экспериментов, применением методов математического моделирования, согласованностью теоретических и экспериментальных результатов.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Методика поэлементного расчета обезвоживания с учетом вариабельности свойств бумажной массы с использованием математического моделирования для создания оптимальной конструкции сеточных частей в зоне формования бумагоделательных машин с точки зрения их обезвоживающей способности.

2. Результаты экспериментального определения увеличения обезвоживающей способности в зоне формования, действующих бумагоделательных машин за счет применения химикатов, улучшающих свойства бумажной массы.

3. Результаты экспериментальной проверки расчета обезвоживания бумажной массы в зоне формования промышленных бумагоделательных машин с учетом вариабельности свойств бумажной массы.

**Апробация работы.** Сделаны доклады на следующих международных научно-практических и научно-технических конференциях: «Новое в конструировании, модернизации, автоматизации бумаго- и картоноделательных машин, СПбГУПТД, Санкт-Петербург, 2016; «Инновации в ЦБП», СПбГУПТД, Санкт-Петербург, 2019; «Леса России: политика, промышленность, наука,

образование», СПбГЛТУ, Санкт-Петербург, 2019; «Актуальные научные исследования», «Наука и просвещение», Пенза, 2021.

**Опубликовано** десять печатных работ, в том числе пять статей в изданиях, входящих в перечень, утвержденный ВАК РФ.

**Личный вклад автора** заключается в разработке последовательности выполнения исследования, проведении экспериментальной работы по определению коэффициентов фильтрации бумажных масс на приборах по различным методикам, обработке полученных результатов, их обобщении и формулировке выводов, а также в подготовке к публикации полученных результатов исследования.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, списка сокращений, списка литературы и приложения. Диссертация изложена на 121 странице машинописного текста и содержит 56 рисунков, 5 таблиц, 113 наименований использованных источников литературы.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, основные защищаемые положения, научная новизна и практическая значимость полученных результатов исследований.

**В первом разделе** выполнен аналитический обзор литературы, посвященной процессам обезвоживания бумажной массы в зоне формования БДМ. Теоретические исследования обезвоживания бумажной массы основываются на том, что одновременно происходит обезвоживание бумажной массы через образующийся слой волокон и течение её в зонах отлива, а также деформации формирующей сетки. Таким образом, обезвоживание на сеточных частях – это сложный процесс, изучая который надо учитывать многие факторы. Обзор литературы показал, что при проведении исследований их авторы не учитывали изменение коэффициентов фильтрации за счет применения химикатов. На основании выше изложенного сформулированы задачи исследований настоящей работы.

**Во втором разделе** теоретически обосновывается поэлементный расчет обезвоживания бумажной массы в зоне формования.

Обезвоживание в зоне формования описывается уравнением для скорости фильтрации:

$$V_{\phi}(t) = \frac{d h(t)}{dt} = K_{\phi} \frac{\Delta H(t)}{\Delta l(t)}$$

Потеря напора описывается уравнением:

$$\Delta H = \mu V_{\phi} a_{\text{в}} + \rho V_{\phi}^2 b_{\text{и}},$$

Толщина слоя волокон определяется по формуле:

$$\Delta l = \Delta h \frac{C_0 - C_R}{C - C_0}$$

В этом разделе также описана методика расчета коэффициентов фильтрации с учетом применения химикатов, улучшающих свойства бумажной массы с использованием уравнений регрессии.

Обезвоживание на сеточном столе в зоне формования происходит на грудной доске, открытых участках сетки и гидропланках. В соответствии с этим расположением предложена методика поэлементного расчета обезвоживания бумажной массы.

**Третий раздел** посвящен экспериментальным исследованиям. Экспериментальное определение коэффициентов фильтрации бумажных масс было проведено на фильтрационных приборах разной конструкции и по нескольким методикам как без химикатов, так с их применением. Расчет обезвоживания бумажной массы производился с использованием фильтрационных характеристик, полученных:

1) на приборе (рисунок 1), как на наиболее апробированном на сегодня в России фильтрационном приборе, использующимся для изучения фильтрационных свойств бумажной массы;

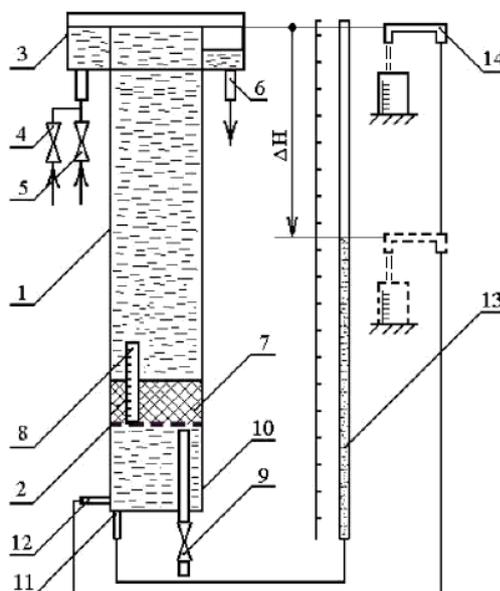


Рисунок 1 – Схема фильтрационного прибора: 1-цилиндр, 2-сетка, 3- ящик, 4,5-краны, 6- трубопровод, 7-слой осевших волокон, 8-мерная шкала, 9-кран для отвода воздуха, 10-донная съемная часть, 11,12-штуцеры, 13- трубка, 14-сливная трубка

2) на приборе с формированием отливки в ходе опыта с непрерывным обезвоживанием при снижающемся напоре.

Для получения экспериментальных данных на приборах была использована бумажная масса с трех предприятий:

1. ОАО «Волга» (Россия, г. Балахна), бумагоделательная машина № 6;
2. Республиканское производственное унитарное предприятие «Завод газетной бумаги» (Белоруссия, г. Шклов), бумагоделательная машина № 1

В качестве обезвоживающего химиката использовался «Polymin» концерна «BASF SE» (Германия). В работе приведены рабочие параметры сеточных столов данных бумагоделательных машин и полученные графики изменения коэффициента фильтрации в зависимости от напора (рисунок 2).

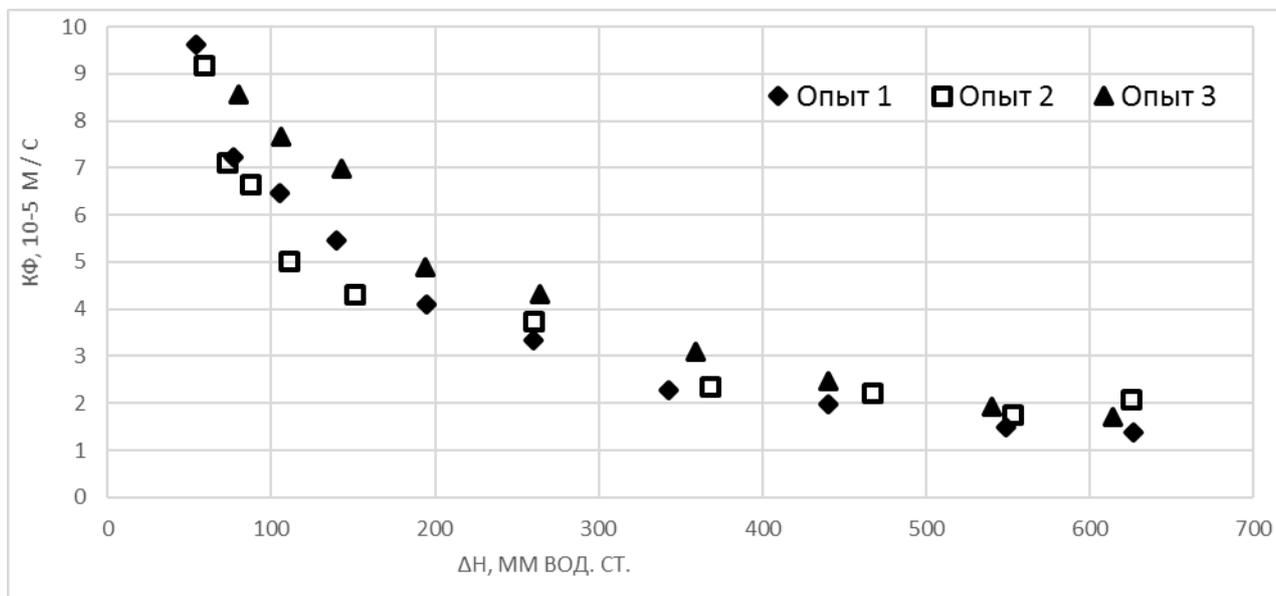


Рисунок 2 – Изменение коэффициента фильтрации бумажных масс в зависимости от напора

Зависимости коэффициентов фильтрации от напора при минимальном и максимальном влиянии аэрации показаны на рисунке 3.

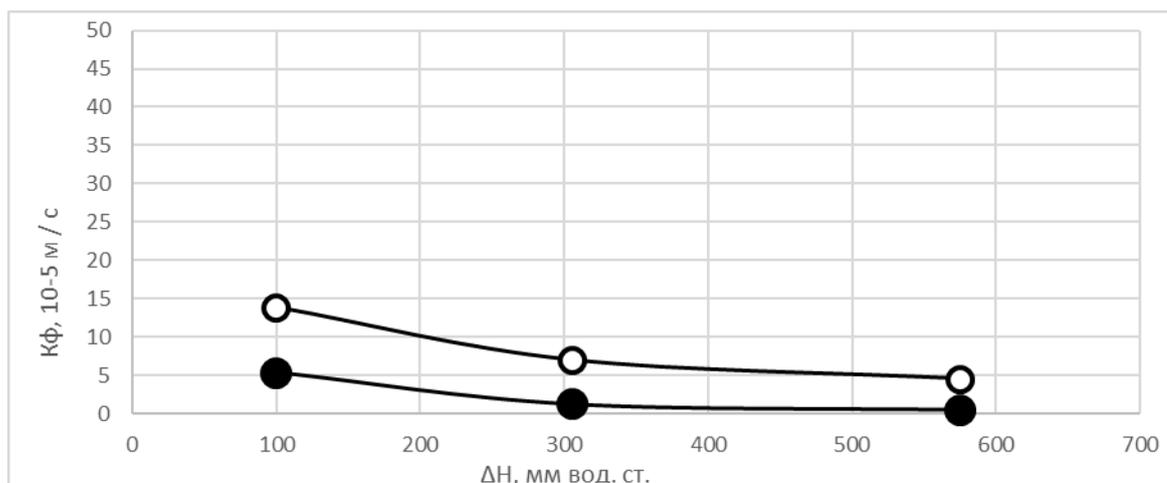


Рисунок 3 - Изменение коэффициента фильтрации бумажных масс в зависимости от напора (○ - минимальная аэрация, ● - максимальная аэрация)

Если коэффициенты фильтрации, полученные на приборе по обычной методике, поместить на одном графике с коэффициентами, полученными при

минимальном и максимальном влиянии осадков, то получим следующие соотношения между ними (рисунок 4).

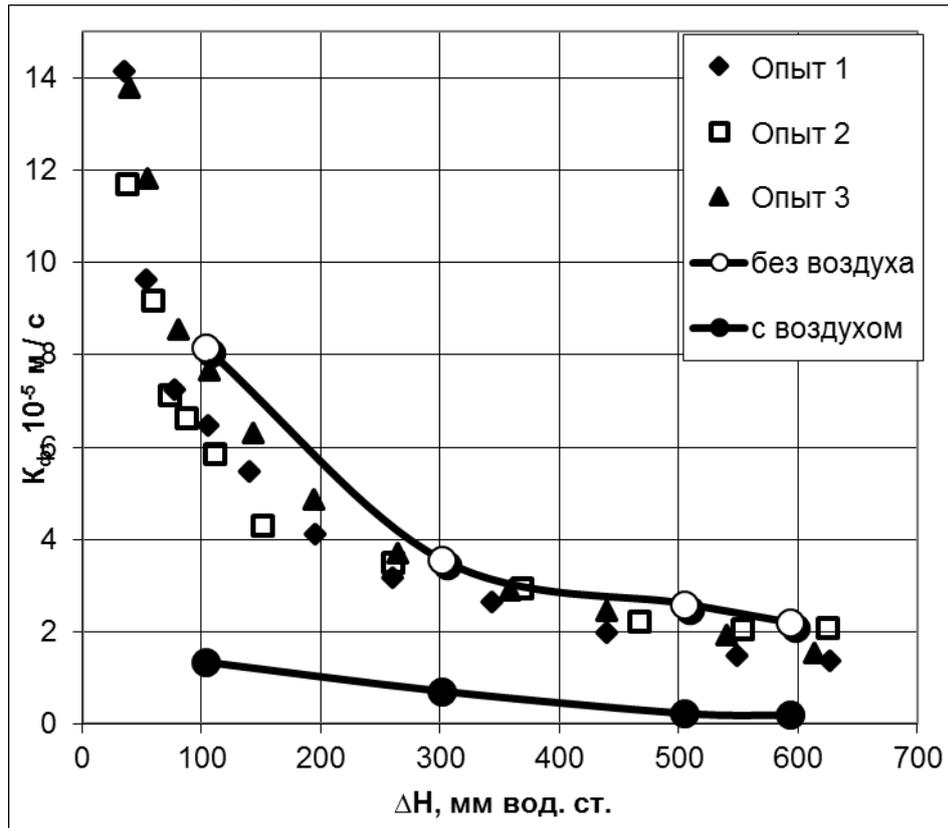


Рисунок 4 - Изменение коэффициента фильтрации в зависимости от напора

Затем проводились эксперименты для о влияния химиката, ускоряющего ход обезвоживания. В бумажную массу добавлялся химикат перед подачей её в цилиндр прибора. Полученный результат для газетной бумаги представлен на рисунке 5.

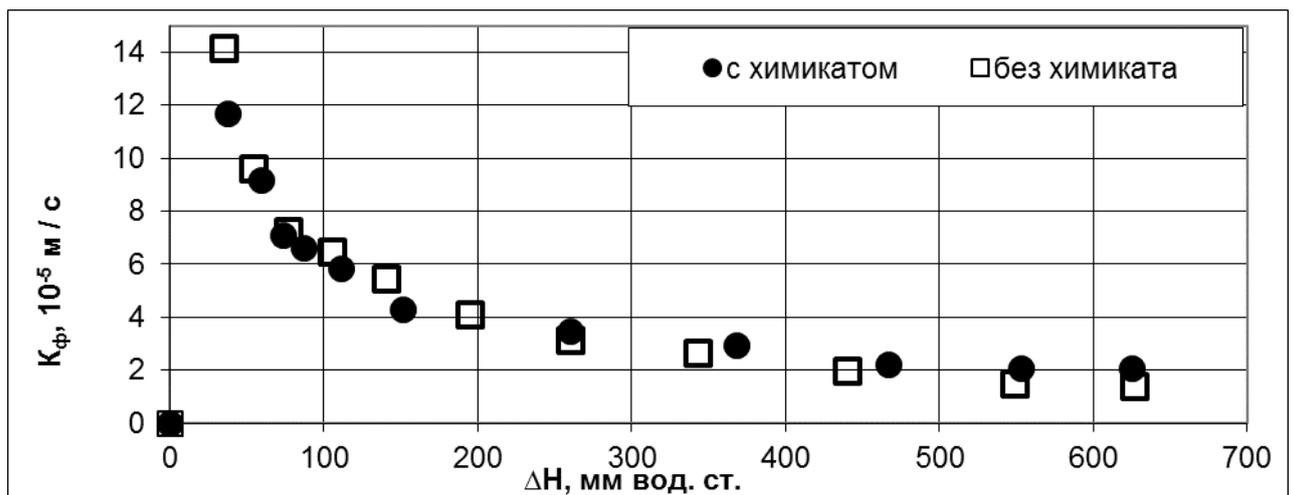


Рисунок 5 – Сравнение лабораторных коэффициентов фильтрации как без, так и с химикатом

На графиках видно незначительное влияния химикатов в данных опытах на начальном этапе на величину лабораторных коэффициентов фильтрации, что можно объяснить кратковременностью их воздействия на бумажную массу. На

действующей бумагоделательной машине химикаты, подаются заблаговременно до подачи бумажной массы на сетку, но время нахождения их в массе от места введения до поступления массы на сеточный стол намного меньше, чем в лабораторных условиях.

Данные, полученные на приборе при более полном учете влияния аэрации массы на снижение коэффициентов фильтрации будут далее использованы для подтверждения результатов о степени соответствия коэффициентов фильтрации, полученных по данным обезвоживания тех же бумажных масс в зоне формования бумагоделательных машин без использования химикатов.

Для изучения фильтрования в режиме снижающегося напора и для ускорения этого процесса используем приведенный на рисунке 2 модифицированный прибор. В данном приборе используется хорошо отстоенная бумажная масса, в нем практически отсутствуют условия для попадания в массу избыточного воздуха, в любой момент времени величины приложенного напора и фильтрационного расхода четко фиксируются по высоте столба массы на сетке, имеется возможность контроля за ходом фильтрования на протяжении всего опыта. После определения характеристической функции фильтрования под действием снижающегося напора без химиката в цилиндр модифицированного прибора вместе с массой был добавлен химикат. Полученные расчетным путем при этом данные приведены на рисунке 6.

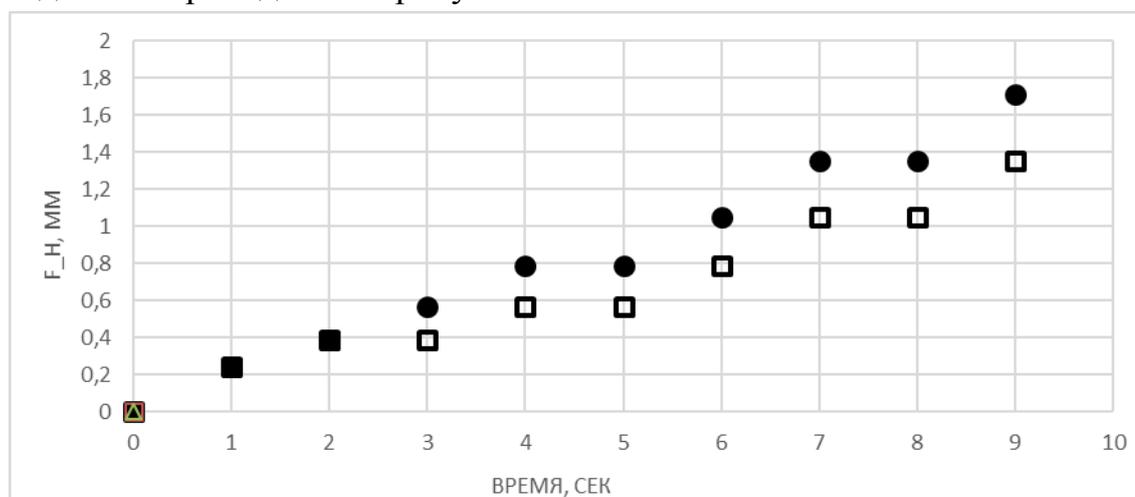


Рисунок 6 – Изменение характеристической функции от времени фильтрации: без использования химиката - □ , и с использованием химиката - ●

Хотя здесь уже наблюдается увеличение коэффициентов фильтрации при использовании химикатов, однако, это ускорение обезвоживания, меньше имевшего место на сеточных частях промышленных бумагоделательных машин. С учетом полученных на фильтрационных приборах результатов был сделан вывод, что достаточно точное определение влияния химикатов на ход обезвоживания в начале сеточного стола в настоящее время возможно только непосредственно на сеточных частях, действующих бумагоделательных машин.

Данные, полученные на модифицированном приборе будут использованы в настоящей работе для дополнительной проверки соответствия лабораторных коэффициентов фильтрации и коэффициентов фильтрации с применением химиката.

Для получения необходимых результатов исследования обезвоживания бумажной массы на сеточных частях действующих бумагоделательных машин как без применения химикатов, так и с их применением было проведено обследование обезвоживающей способности сеточных столов, следующих БДМ:

- 1) ОАО «Волга» (Россия, г. Балахна), БДМ № 6;
- 2) РУП «Завод газетной бумаги» (Белоруссия, г. Шклов), БДМ № 1;
- 3) АО «Монди Сыктывкарский лесопромышленный комплекс» (Россия, г. Сыктывкар), БДМ № 11.

Данные полученные непосредственно на действующей БДМ при оптимальных режимах их работы как без применения химикатов, так и с их применением представлены на рисунке 7.

Таблица 1 – Рабочие параметры сеточного стола БДМ № 1 РУП «Завод газетной бумаги» (Белоруссия, г. Шклов)

Наименование	Показатель
1. Продукция	Газетная бумага
2. Производительность БДМ, т/ч	5,88
3. Скорость БДМ, м/мин	818
4. Масса 1 м <sup>2</sup> бумаги, г	45
5. Длина сетки, м	41,1
6. Ширина сетки, м	3,1
7. Коэффициент гидравлического сопротивления сетки	0,5
8. Ширина бумажного полотна на накате, м	2, 58
9. Степень помола бумажной массы, ШР <sup>0</sup>	77
10. Концентрация бумажной массы, %	0,9
11. Удержание на сетке, %	38,9
12. Температура бумажной массы, t <sup>0</sup> С	56
13. Скорость сетки, м/мин	779
14. Композиция бумажной массы, %	ТММ - 60 Брак - 40
15. Тип и номер сетки (сетка синтетическая)	№ 3760-7/4
16. Концентрация слоя осевших волокон, %	5
17. Количество пакетов гидропланок, шт	8
18. Углы наклона гидропланок, град	1-2
19. Концентрация регистровой воды, %	0,39

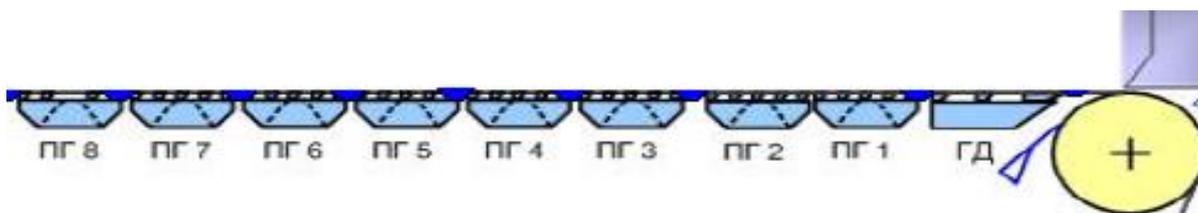
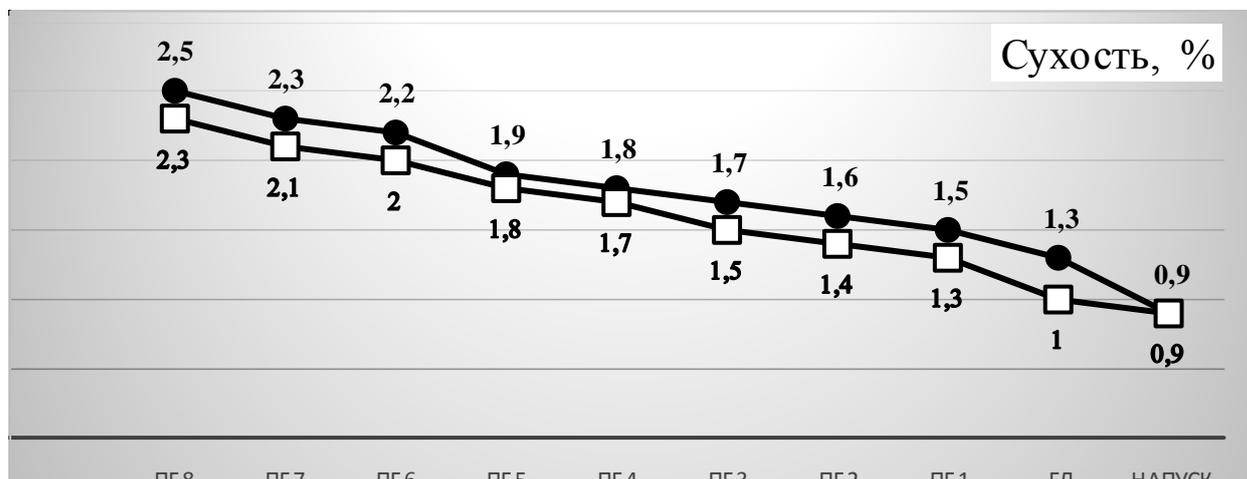


Рисунок 7 – Обезвоживание в зоне формования на БДМ №1 (г. Шклов) ГД – грудная доска; ПГ – пакеты гидропланок; без использования химиката - □, с использованием химиката - ●

Данные графики показывают увеличение сухости бумажной массы при применении химикатов на сеточном столе в зоне формования. На графиках видна разница между ходом обезвоживания без применения химикатов и с их применением, чего нельзя было с достаточной точностью получить в результате лабораторных испытаний на приборе. Указанные данные с действующих БДМ при оптимальных режимах их работы с применением химикатов позволяют вести дальнейшие расчеты обезвоживающей способности сеточного стола с использованием уравнений регрессии.

В данной работе для проведения расчетов предварительно определялась изгибная жесткость сеток, используемых на обследуемых сеточных частях бумагоделательных машин. Данные по изгибной жесткости сеток, полученные расчетом после проведения испытаний сеток БДМ на стендах, позволили более точно рассчитать ход обезвоживания в зоне формования.

**Четвертый раздел** посвящен сравнению результатов исследования фильтрационных характеристик бумажных масс при применении химикатов в сеточных частях бумагоделательных машин. Более точное расчетное определение хода обезвоживания на промышленных БДМ при применении на них химикатов возможно только по данным, полученным непосредственно с действующих бумагоделательных машин. Получив с предприятий данные, можно производить расчет обезвоживания бумажной массы на сетках аналогичных бумагоделательных машин с учетом применения химикатов.

В четвертом разделе проведен расчет обезвоживания в зоне формования с учетом variability свойств бумажной массы с использованием математического моделирования.

Исходные данные для программного расчета представлены на рисунке 8.

**Исходные данные.**

Скорость сетки  м/мин

Концентрация массы, поступающей из напорного ящика  %

Коэффициент гидравлического сопротивления сетки  ξ

Высота транзитного слоя на регистровых валиках  м

Температура массы поступающей на сетку  C

Коэффициент фильтрации  м/с

Концентрация регистровой воды  %

Масса 1 м<sup>2</sup> бумаги на накате  г

Концентрация слоя осевших волокон  %

Рисунок 8 – Интерфейс программы для ввода исходных данных

Следующим этапом является ввод в программу конструктивных параметров для каждого элемента в зоне формования (рисунок 9). В качестве конструктивных показателей вводятся радиус грудного вала, длина грудной доски, длина наклонной поверхности гидропланки, угол наклона гидропланки к сетке, угол передней кромки гидропланки, расстояния между элементами.

**Элементы регистровой части**

**Полученная линия**

Рисунок 9 – Интерфейс программы для ввода конструктивных параметров

На приведенных рисунках 10 и 11 показано сопоставление полученных расчетом значений с данными с действующей промышленной БДМ.

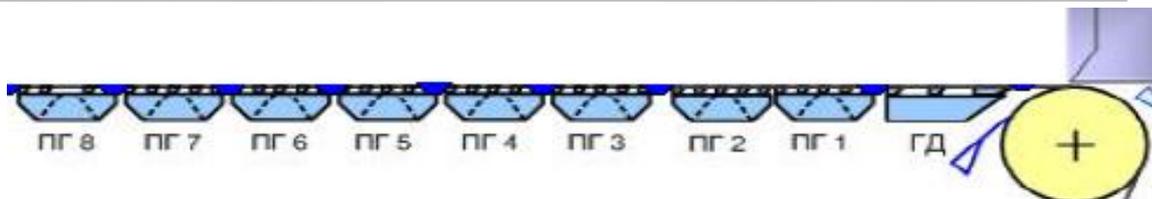
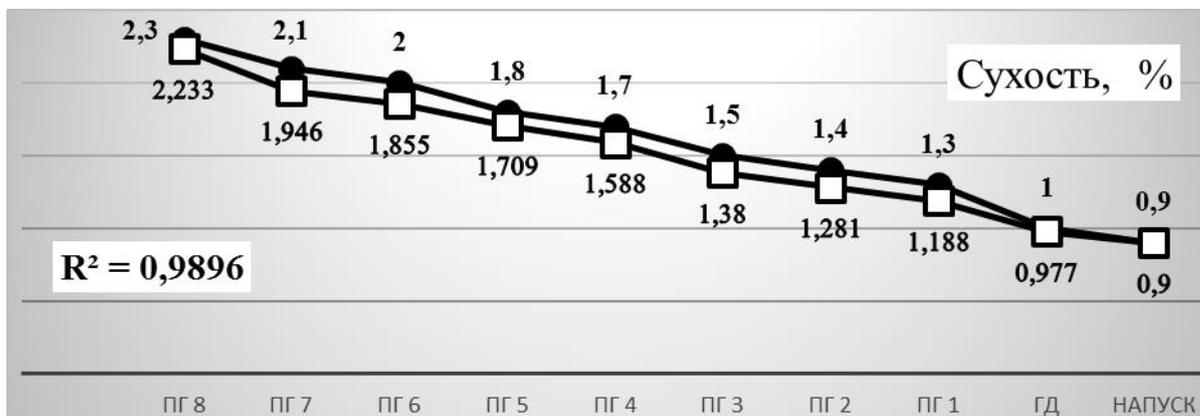


Рисунок 10 - Сухость (концентрация) в зоне формирования БДМ №1 (г. Шклов).

Обозначение: ГД – грудная доска; ПГ – пакеты гидропланок;

расчет - □ , данные с БДМ - ●

$R^2$  – величина достоверности аппроксимации

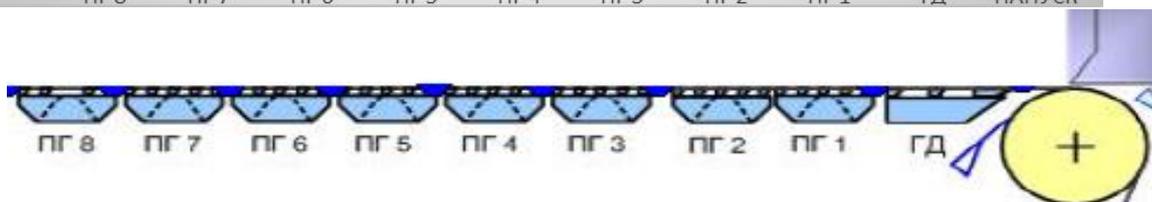
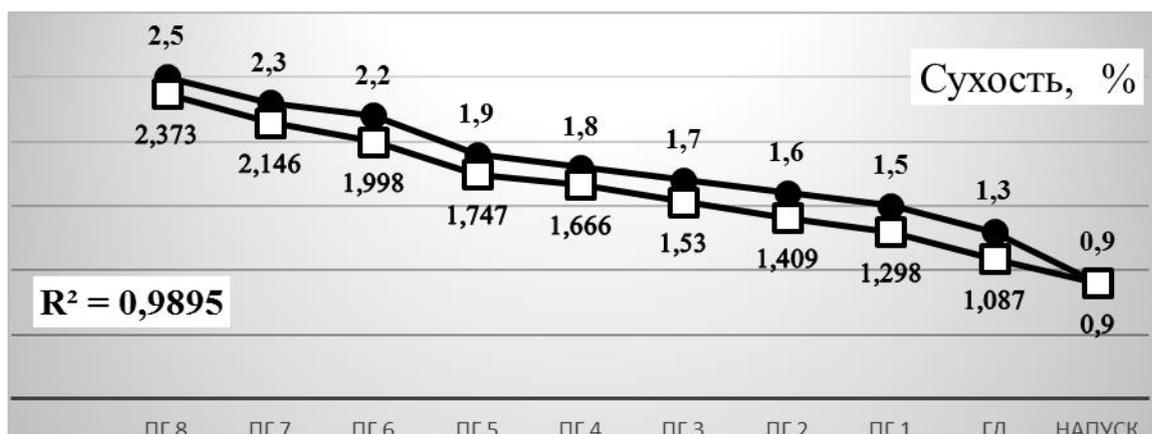


Рис. 11 - Сухость (концентрация) в зоне формирования БДМ №1 (г. Шклов).

Обозначение: ГД – грудная доска; ПГ – пакеты гидропланок;

расчет с учетом увеличения коэффициентов фильтрации - □ ,

данные с БДМ с учетом применения химиката - ●

$R^2$  – величина достоверности аппроксимации

Полученные данные подтверждают адекватность предложенной методики и позволят проводить расчет обезвоживания бумажной в зоне формирования бумагоделательных машин с учетом вариабельности свойств бумажной массы.

**Пятый раздел** посвящен экономическому обзору мирового и Российского рынков печатной бумаги. Мировое производство бумаги продолжит

восстанавливаться в 2022 году и достигнет примерно 400 млн. тонн. Однако этот объем будет меньше показателей прошлых лет. С 2015 по 2022 год больше всего снизились объемы выпуска бумаги в Европе, в Азии и в Северной Америке. Рынок бумаги для печати в России незначительно растет, в основном за счет наращивания объемов производимой продукции на территории страны. В 2020 году экспорт газетной бумаги из России снизился на 15,3%, составив 1 052 тыс т. Основными покупателями газетной бумаги в 2020 г являлись Индия (373 тыс т) и Китай (285 тыс т). Страны Юго-Восточной Азии являются перспективным направлением для экспорта.

### **Выводы по диссертационной работе:**

1. Проведен анализ отечественных и зарубежных источников литературы, в которых исследуется обезвоживание бумажной массы в зоне формования бумагоделательных машин с использованием математического моделирования.

2. Развита теория и предложена методика расчета обезвоживания бумажной массы в зоне формования бумагоделательных машин.

3. Определены коэффициенты фильтрации на приборах по разным методикам, как без химикатов, улучшающих свойства бумажной массы так и с ними.

4. Экспериментально на действующих бумагоделательных машинах проверена предложенная методика расчета обезвоживания с учетом применения химикатов, улучшающих свойства бумажной массы в оптимальных технологических режимах их работы.

5. Разработана методика поэлементного расчета обезвоживания в зоне формования с учетом вариабельности свойств бумажной массы с использованием математического моделирования на примере бумагоделательных машин по выработке печатных видов бумаги.

### **Основные результаты диссертации изложены в публикациях в следующих журналах из перечня, рекомендуемого ВАК РФ**

1. Ключкин, И.В. Совершенствование расчетов обезвоживания в сеточных частях БДМ и КДМ с целью учета влияния химикатов, применяемых для ускорения обезвоживания / И.В. Ключкин, Н.Н. Кокушин, П.В. Осипов, П.В. Кауров // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2015, №4. С. 44-46.

2. Ключкин, И.В. Расчет обезвоживания бумажной массы на гидропланках с учетом использования химикатов / И.В. Ключкин, Н.Н. Кокушин, П.В. Осипов, П.В. Кауров // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2015, №8. С. 62-64.

3. Ключкин, И.В. Математическая модель отлива бумажного полотна на гидропланках при использовании гибких формирующих сеток / И.В. Ключкин, Н.Н. Кокушин, П.В. Кауров, М.В. Колычев // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2016, №4. С. 71-73.

4. Ключкин, И.В. Об оценке химического фильтрования – обезвоживания в мокрой части машин / И.В. Ключкин, Н.Н. Кокушин, П.В. Осипов, П.В. Кауров // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2016, №10. С. 66-68.

5. Ключкин, И.В. Интенсификация процесса обезвоживания в мокрой части бумагоделательных машин применением химических продуктов / П.В. Осипов, И.В. Ключкин, Н.Н. Кокушин, П.В. Кауров // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна. – СПб.: СПбГТУРП, 2018, Серия 1, №4. С. 66-73.

#### **Прочие публикации**

6. Ключкин, И.В. Учет влияния химикатов, применяемых для ускорения обезвоживания на сеточных частях бумагоделательных машин, при расчете обезвоживания бумажной массы / И.В. Ключкин, Н.Н. Кокушин, П.В. Кауров // Машины и аппараты целлюлозно-бумажного производства: межвуз. сб. науч. тр. – СПб.: СПбГТУРП, 2011, С. 40-41.

7. Ключкин, И.В. Моделирование обезвоживания бумажной массы в зоне формования / И.В. Ключкин // Новое в конструировании, модернизации, автоматизации БДМ: сб. тр. международной научно-практической конференции – СПб.: СПбГУПТД «КРОНА», 2016, С. 17-20.

8. Ключкин, И.В. Расчет обезвоживания бумажной массы в зоне формования / И.В. Ключкин // Инновации в ЦБП: сб. тр. международной научно-практической конференции – СПб.: СПбГУПТД «КРОНА», 2019, С. 11-14.

9. Ключкин, И.В. Расчеты обезвоживания бумажной массы в зонах формования плоскосеточных столов с учетом применения химикатов / И.В. Ключкин // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: сб. тр. международной научно-технической конференции – СПб.: СПбГЛТУ, 2019, С. 286-289 .

10. Ключкин И.В. Моделирование обезвоживания в зоне формования бумагоделательных машин / И.В. Ключкин, Т.Н. Александрова // Актуальные научные исследования: сб. тр. международной научно-практической конференции – Пенза: МЦНС «Наука и просвещение», – 2021, С. 31-33.