

Южно-Казахстанский университет им. М.Ауэзова

УДК 66.047.+674.04

На правах рукописи

КОБЕЕВА ЗАГИРА САПАРБЕКОВНА

**Гидродинамика и тепломассообмен при фильтрационной сушке
измельченной древесины**

6D072400 - Технологические машины и оборудование

Диссертация на соискание степени
доктора философии (PhD)

Научный консультант
к.т.н., доцент Хусанов Алишер
Евадиллоевич

Зарубежный научный консультант
д.т.н., профессор
Атаманюк Володимир Михайлович

Республика Казахстан
Шымкент, 2022

СОДЕРЖАНИЕ

	НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ.....	4
	ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ.....	5
	ВВЕДЕНИЕ.....	7
1	РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ПЕРЕРАБОТКЕ ОТХОДОВ РАСТИТЕЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ	14
1.1	Переработка отходов растительного происхождения с целью получения материалов широкого потребления	15
1.2	Анализ существующих технологий сушки материалов растительного происхождения и видов оборудования	21
1.3	Гидродинамика процесса фильтрационной сушки измельченных материалов	26
1.4	Тепломассообмен при фильтрации теплового агента через стационарные слои дисперсных материалов	31
1.5	Анализ кинетики процесса фильтрационной сушки измельченных материалов	35
1.6	Диффузионный массоперенос при сушке измельченных материалов	37
1.7	Постановка задач исследований.....	39
2	ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ, ОПИСАНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	42
2.1	Основные характеристики стеблей хлопка.....	42
2.2	Методики определения основных параметров и характеристик объекта исследования	44
2.3	Описание экспериментальной установки для исследования гидродинамических, кинетических и тепло - и массообменных параметров процесса фильтрационной сушки измельченных стеблей хлопка	49
2.4	Методика оценки погрешностей измерений	51
3	ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ СТАЦИОНАРНОГО СЛОЯ ИЗМЕЛЬЧЕННЫХ СТЕБЛЕЙ ХЛОПКА (ГУЗА ПАЯ) ПРИ ФИЛЬТРАЦИИ ТЕПЛООВОГО АГЕНТА.....	53
4	КИНЕТИКА И ПРОЦЕССЫ ТЕПЛОМАСООБМЕНА ПРИ ФИЛЬТРАЦИОННОЙ СУШКЕ ИЗМЕЛЬЧЕННЫХ СТЕБЛЕЙ ХЛОПКА (ГУЗА ПАЯ)	61
4.1	Теоретический анализ кинетики фильтрационной сушки	61
4.2	Экспериментальное исследование кинетики фильтрационной сушки измельченных стеблей хлопка	66
4.3	Обобщение экспериментальных исследований кинетики в периодах полного и частичного насыщения теплового агента влагой	68

4.4	Определение значений относительной погрешности и анализ результатов исследования кинетики фильтрационной сушки измельченных стеблей хлопка	77
4.5	Процессы тепломассообмена при фильтрационной сушке измельченных стеблей хлопка	80
5	РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ, ЭКСПЛУАТАЦИИ И ВНЕДРЕНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННОЙ СУШИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ.....	89
5.1	Описание конструкции и принципа работы фильтрационной установки для сушки измельченных стеблей хлопка	89
5.2	Рекомендации по проектированию и эксплуатации фильтрационной сушильной установки.....	91
5.3	Методика и порядок расчета фильтрационной установки для сушки измельченных стеблей хлопка	92
5.4	Промышленные испытания и внедрение фильтрационной сушильной установки.....	94
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	98
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	100
	ПРИЛОЖЕНИЯ.....	111

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящей диссертации использованы ссылки на следующие стандарты:

СТ РК 2.21-2019 ГСОЕИ РК. Порядок проведения испытаний и утверждения типа средств измерений;

СТ РК 2.4-2019 ГСОЕИ РК. Поверка средств измерений. Организация и порядок проведения.

СТ РК 2.1-2018 ГСОЕИ РК. Метрология. Термины и определения;

СТ РК 2.3-2019 ГСОЕИ РК. Эталоны единиц величин. Основные положения, порядок создания, утверждения, хранения и применения;

СТ РК 2.15-2018 ГСОЕИ РК. Государственный метрологический контроль;

ГОСТ 7.32-2017. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления.

ГОСТ 7.1-2003 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления.

ГОСТ 8.009-84 Государственная система обеспечения единства измерений. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В диссертационной работе использованы следующие обозначения и сокращения:

A, a – коэффициент; удельная объемная поверхность контакта фаз, $\text{м}^2/\text{м}^3$; длина волокон, м

B, b, ν – коэффициент; ширина, м; барометрическое давление, Па;

C – концентрация, $\text{кг}/\text{м}^3$; коэффициент сопротивления; теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$;

D, d – диаметр аппарата, м; коэффициент диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$; диаметр волокон, отверстия, частицы, эквивалентный диаметр, м;

F – поверхность, м^2 ; сила Н;

G, g – массовый расход, $\text{кг}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$, масса навески, кг; ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$;

H – высота, м;

I – энтальпия, кДж/моль;

K, k – коэффициент; коэффициент тепло-массопередачи, м/с; константа;

ℓ – длина, м;

m – масса, кг; величина, $\text{л}/\text{м}^3$; безразмерное волновое число;

N, n – коэффициент; количество, шт;

P – давление, Па; давление насыщенного пара, Па;

ΔP – гидравлическое сопротивление или перепад давления, Па;

Q – расход, $\text{м}^3/\text{с}$;

ΔQ – количество теплоты, Дж;

r – радиус, м;

S – площадь, м^2 ; площадь поперечного сечения, м^2 ;

T – температура, К;

v – скорость, м/с;

V – объем, м^3 ;

w – влагосодержание, $\text{кг H}_2\text{O} / \text{кг сух. мат.}$;

ζ – коэффициент гидравлического сопротивления;

α – коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/\text{м}^2\cdot\text{К}$;

β – коэффициент массоотдачи, м/с;

ε – порозность слоя волокон $\text{м}^3/\text{м}^3$;

λ – коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; длина волн, м;

μ – коэффициент динамической вязкости, $\text{Па}\cdot\text{с}$;

ν – коэффициент кинематической вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$;

ρ – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$;

τ – время, с; касательное напряжение, Па;

φ – относительная влажность воздуха, в долях;

Φ – коэффициент формы;

Числа:

Ei-число Эйлера;

Pr – число Прандтля;

Re – число Рейнольдса;

Sc – число Шмидта;

Sl – число Струхаля;

Nu-число Нуссельта;

Le-число Люиса.

Индексы, сокращения:

0-начальная, фиктивная;

l-слой;

v-удельная;

в – вихрь; вертикальный, воздух; волокно;

вх-вход;

вых-выход;

г – газовая фаза; гидравлический;

δ – динамическая высота;

ж – жидкая фаза; жидкость;

з – зона;

к – конечная; квадратная, контейнер, кожа;ра;

кр – критическая;

м.т-мокрый термометр;

мат-материал;

н – начальная;

нас-насыпная;

общ-общая;

п – поверхность, пора;

р – радиальный;

сл – слой;

ср – среднее;

сух – сухой;

тек-текущая;

тр – трения;

ус-усредненная;

фр-фракция;

ф-фиктивная;

ч-частица;

э – эффективная;

экв – эквивалентный;

яч – ячейка;

я-ядро.

ВВЕДЕНИЕ

Оценка современного состояния решаемой научной проблемы. Процесс сушки широко применяется на подготовительном и завершающем этапе производства продукции. Материалы подвергаются обезвоживанию для уменьшения их веса, увеличения срока хранения, предотвращения гниения и сохранения качественных показателей.

При сушке материалов затрачивается большое количество тепловой энергии. Обычно этот процесс продолжается до установления равновесия между влагосодержанием теплового агента и влагосодержанием материала. Для каждого материала нужно подобрать оптимальный способ и параметры для сушки [1].

Большая энергоемкость процесса сушки приводит в целом к неоправданным потерям. Следствием является также повышение выбросов в окружающую среду и снижение качества материалов. Чтобы обеспечить высокое качество материала при сушке должны использоваться такие физические механизмы сушки, ход которых не так сильно связан с изменяющимися в процессе сушки тепло- и массопроводностью [2].

При конструировании установок для сушки необходимо придерживаться следующих требований: обеспечение равномерного нагрева и сушки материала, при этом температура процесса и влажность материала должна быть под постоянным контролем, кроме этого, проектируемая установка должна иметь низкую металлоемкость. При выборе конструкции промышленной сушильной установки предварительно следует учитывать рабочий объем, принцип работы и тип сушильного агента, потребляемая мощность на один цикл, производительность, возможность совершенствования и наличие дополнительных опций [3].

Для создания нового и высокоэффективного оборудования нужно исследовать основные характеристики и закономерности взаимодействия теплового агента с слоем материала.

Основанием для разработки темы явилось отсутствие результатов комплексного и системного подхода к интенсификации процессов сушки влажных стеблей хлопка-сырца, а также необходимость разработки научно-обоснованной методики и порядка расчета фильтрационной сушильной установки.

Исходными данными для проведения исследований явились результаты работ по разработке сушильных установок и закономерности фильтрационной сушки измельченных материалов растительного происхождения.

Обоснованием необходимости проведения научно-исследовательской работы послужила недостаточная изученность процесса сушки измельченных стеблей хлопка в сушильной установке, использующей принцип фильтрации сушильного агента через слой материала.

Сведения о планируемом научно-техническом уровне разработки. Разработка конструкции фильтрационной сушильной установки для измельченных стеблей хлопка и созданные методики расчета базируются на

теоретических основах тепло- и массообмена, тепломассопереноса, термодинамики влажного воздуха и теории подобия, что свидетельствует о высоком научно-техническом уровне разработки.

Сведения о патентных исследованиях. Проведенный патентный поиск на глубину более сорока лет охватывает конструкции современных сушильных установок и известные классические методы сушки. Сопоставляя преимущества и недостатки известных методов и конструкций сушильных устройств, результаты патентного поиска позволили сделать заключение, что разработанная конструкция фильтрационной сушильной установки для сушки измельченных стеблей хлопка позволит повысить эксплуатационную надежность, интенсивность и эффективность работы в процессе фильтрационной сушки, а также обеспечить низкую энергоемкость процесса.

Сведения о метрологическом обеспечении научно-исследовательской работы. Диссертационная работа выполнена с использованием официальных терминов Международной организации законодательной метрологии. Экспериментальные исследования проведены на установке, в которой используются приборы, прошедшие метрологическую государственную поверку и обеспечивающие необходимый класс точности, соответствующий научно-исследовательским работам. В приведенных уравнениях, зависимостях и рисунках использованы единицы измерений, соответствующие системе СИ.

Актуальность проблемы. Согласно Государственной Программы индустриально-инновационного развития Республики Казахстан на 2020 - 2025 годы стабильный рост и конкурентоспособность обрабатывающего сектора будут достигаться путем создания технологически прогрессивной промышленности, трансформации и цифровизации основных фондов действующих предприятий, ориентированных на создание средне-, высокотехнологичной продукции с последующим выходом на глобальные рынки [4]. К 2025 году посевные площади хлопка Южно-Казахстанского региона должны увеличиться на 100 тыс. га, урожайность – 30 ц/га, а производство хлопка до 300 тыс. тонн/год. В Южном регионе Казахстана действует экономическая зона «Онтустик», которая создана с целью развития текстильной отрасли Казахстана [5]. При переработке хлопка-сырца доминирующим являются отходы возделывания хлопка. Основную их массу образует гуза-пая – стебли и корневища растений этой технической культуры [6]. Стебли хлопчатника (гуза-пай), объем которого ежегодно составляет свыше 0,5 млн. тонн являются весьма перспективным сырьем для переработки с целью получения строительных материалов. Сравнительно незначительная часть этих отходов используется населением для бытовых нужд в качестве топлива. Другие попытки переработки гуза-пай не нашли какого-либо масштабного практического применения. Часто эти отходы сжигают непосредственно на полях или перерабатывают с помощью термохимических процессов, таких как пиролиз с целью рекуперации энергии [7,8]. Поэтому качественное хранение и глубокая переработка отходов хлопка-сырца являются основными задачами сельского хозяйства.

Многочисленными исследованиями установлено, что одним из путей рационального использования сельскохозяйственных отходов является применение их в качестве связующего для асфальтобетонных смесей [9], в качестве теплоизоляционно-конструкционного строительного материала [6, с.29], наружная кора стеблей хлопка является волокнистой и может быть использована в качестве источника волокон [3, с. 13]. В работе рассматривается потенциальное производство энергии из стеблей хлопчатника путем сжигания, гидротермальной карбонизации, ферментации и технологий анаэробного сбраживания [2, с. 2]. В проведенных ранее исследованиях по данной проблеме [6, с.28, 7, с.769, 8, с.161, 9, с. 600, 3, с.14, 2, с.4], в основном, решены задачи получения подобных материалов. Однако, в настоящее время в необходимом объеме отсутствуют исследования по вопросам переработки и утилизации гуза-пая, что затрудняет прогнозирование долговременной сохранности ее качества [10-12].

При переработке все материалы и изделия подвергаются сушке, которая во многом определяет качество продукции, экономику и экологическую безопасность производства. Вместе с тем, исследование физического механизма и кинетических особенностей процессов сушки имеет особое значение [13]. Без таких результатов совершенствование сушильных процессов и оборудования невозможно, и поэтому поставленная проблема имеет большую практическую актуальность. Такие исследования представляют и самостоятельный научный интерес, так как методологическая общность возникающих проблем тепло-и массопереноса характерна для многих процессов в разных отраслях промышленности и естествознания.

В связи с этим, в наших исследованиях [14,15] с единых теоретических позиций рассмотрена и экспериментально подтверждена целесообразность применения материалов на основе стеблей хлопчатника, исследуя физико-химические основы их структурообразования и физико-технические, в том числе и теплофизические свойства. С целью определения основных параметров и характеристик объектов исследования, наши исследования были начаты с определения основных характеристик стеблей хлопчатника рыхлой структуры [14, с.107], а также с исследования гидродинамики фильтрации газового потока сквозь стационарный слой измельченных стеблей хлопчатника (гуза пая) [15, с.47].

Переработка и утилизация сельскохозяйственных отходов, с получением строительного материала как целевого продукта, являются актуальными задачами в условиях экономического кризиса в мире. Решение указанных задач позволяет уменьшить долю применения традиционных источников сырья в государственном и частном секторах, что способствует повышению эффективности экономики государства.

Вместе с тем, отсутствие соответствующих исследований и научно обоснованных методов расчета сдерживает внедрение фильтрационных сушильных установок в промышленность.

В связи с этим, проведение исследований процессов фильтрационной сушки стеблей хлопка с целью ее дальнейшей переработки, разработка методологии расчета и проектирования фильтрационных сушильных установок, рекомендаций по их эксплуатации являются актуальными.

Работа выполнялась в соответствии с направлением исследований по госбюджетной НИР ЮКУ им. М.Ауэзова Б-16-01-05 «Разработка методики конструирования и расчета высокоэффективных теплообменных аппаратов и устройств общепромышленного назначения» на 2016-2020 г.г.

Объект и предмет. Объектом исследований является установка фильтрационной сушки и измельченные стебли хлопка.

Предметом исследований явились гидродинамические и кинетические закономерности, процессы теплообмена при фильтрационной сушке измельченных стеблей хлопка.

В работе методологической базой явились современные методы физического и математического моделирования. Для определения гранулометрического состава полидисперсной смеси измельченных стеблей хлопка использовали ситовой анализ, а для определения структурного строения отдельных частей и слоя использовали методы электронной микроскопии. Экспериментальные исследования теплообмена осуществляли с помощью методов теплофизического моделирования с использованием интеллектуального измерительного преобразователя с выводом информации на персональный компьютер. Для решения дифференциальных уравнений использовали числовые и аналитические методы. Для обработки и обобщения результатов экспериментальных исследований использовали компьютерную технику и пакеты прикладных программ, а именно: Excel, Graf4Win, Corel Draw, MathCAD, AutoCAD.

Цель работы: разработка теоретических основ гидродинамики, кинетики и динамики теплообменных процессов фильтрационной сушки измельченных стеблей хлопка, их экспериментальное подтверждение и на основе полученных научных результатов создание методики расчета и проектирования фильтрационной сушильной установки, а также испытание в производственных условиях с внедрением в промышленность.

В соответствии с поставленной целью решались следующие **задачи:**

- определение физико- химических характеристик, гранулометрического- фракционного состава полидисперсной смеси измельченных стеблей хлопка, пористости, плотности и установление формы частиц;
- разработка конструкции фильтрационной установки для сушки измельченных древесных материалов;
- экспериментальное исследование гидравлического сопротивления пористой структуры слоя измельченных стеблей хлопка под воздействием теплового агента и представление результатов экспериментальных зависимостей в виде безразмерных комплексов, определение опытных коэффициентов модифицированного уравнения Эргуна;

- экспериментальное исследование кинетики фильтрационной сушки измельченных стеблей хлопка при изменении скорости, температуры теплового агента и высоты слоя, а также установление периодов полного и частичного насыщения теплового агента;

- получение зависимостей для расчета времени достижения критической влажности, времени сушки в периоде частичного насыщения теплового агента и расчетное уравнение для определения общего времени фильтрационной сушки измельченных стеблей хлопчатника от начального до конечного влагосодержания;

- изучение процессов тепломассообмена между тепловым агентом и сухих, а также влажных измельченных стеблей хлопка при фильтрационной сушке и обобщение результатов экспериментальных исследований в безразмерной форме;

- разработка методики и порядка расчета фильтрационной сушильной установки для сушки измельченных стеблей хлопка основанных на полученных результатах, а также рекомендаций по эксплуатации и проектированию;

- испытание результатов исследований в опытно-промышленных условиях и внедрение в промышленности.

Научная новизна работы заключается в том, что в результате комплексного теоретического и экспериментального исследования гидродинамики, тепломассообмена, внутридиффузных процессов и кинетики фильтрационной сушки создана научно обоснована методика и порядок расчета фильтрационной сушильной установки для сушки измельченных стеблей хлопка. При этом:

- на основании зависимости Дарси-Вейсбаха выведена функциональная зависимость критерия Эйлера от критерия Рейнольдса и геометрического симплекса, учитывающая влияние режимных и геометрических параметров фильтрационной сушильной установки на потери давления в неподвижном слое измельченных стеблей хлопка, обобщением экспериментальных данных определены опытные коэффициенты модифицированного уравнения Эргуна;

- установлены периоды полного и частичного насыщения теплового агента на основе исследования закономерностей кинетики фильтрационной сушки измельченных стеблей хлопка в зависимости от температуры, скорости теплового агента и высоты стационарного слоя, а также получена зависимость для определения значения кинетического коэффициента “ η ” для измельченных стеблей хлопчатника;

- исходя из выявленных закономерностей кинетики фильтрационной сушки влажных измельченных стеблей хлопка получена зависимость для расчета времени достижения критической влажности, времени сушки в периоде частичного насыщения теплового агента и расчетное уравнение для определения общего времени фильтрационной сушки измельченных стеблей хлопчатника от начального до конечного влагосодержания;

- на основании теории подобия, известных законах тепломассообмена, тепломассопереноса, термодинамики влажного воздуха предложены

критериальные зависимости чисел Нуссельта и Шервуда для определения технологических параметров процесса фильтрационной сушки измельченных стеблей хлопка.

Практическая ценность работы. Разработана конструкция фильтрационной сушильной установки для сушки измельченных стеблей хлопка, защищенная патентом на полезную модель РК №6241 [16] (Приложение А).

Разработаны методика и порядок расчета, рекомендации по проектированию и эксплуатации фильтрационной сушильной установки для сушки измельченных стеблей хлопка.

Полученные результаты, методика и порядок расчета, рекомендации по эксплуатации и проектированию фильтрационной сушильной установки могут быть использованы в высших и средних технических учебных заведениях в учебном процессе, в научно-исследовательских и проектных организациях, инженерно-техническими и научными работниками перерабатывающих отраслей промышленности при усовершенствовании и модернизации промышленных установок.

Апробация практических результатов. По результатам проведенных исследований разработана конструкция промышленной фильтрационной сушильной установки для сушки измельченных стеблей хлопка, которая внедрена на ТОО «Хлопкоперерабатывающий завод Мырзакент» с эффектом по снижению энергопотребления за 1 тонну перерабатываемого сырья до 1704,1 кВт·ч (Приложения Г).

Кроме того, результаты НИР по созданию фильтрационной сушильной установки и методики расчета внедрены в учебный процесс для проведения лекционных и практических занятий по дисциплине «Оборудование для сушки твердых материалов» в раздел «Сушка древесины» и по дисциплине «Процессы и аппараты химической технологии» в разделе «Сушка. Способы тепловой сушки» (Приложения Б, В).

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, базирующихся на теоретических основах тепло- и массообмена в процессах сушки, фундаментальных законах механики жидкости и газа, полностью подтверждены результатами собственных исследований, полученных на лабораторных и промышленных установках, а также сопоставлением с литературными данными.

Научные положения, выносимые на защиту:

- результаты опытов по определению фракционного состава, пористости, насыпной и истинной плотности, установленные геометрические формы измельченных стеблей хлопка;
- разработанная конструкция фильтрационной установки для сушки измельченных стеблей хлопка;
- результаты исследования гидравлического сопротивления при фильтрации теплового агента через стационарный слой измельченных стеблей хлопка, опытные коэффициенты модифицированного уравнения Эргуна, а

также расчетные зависимости в виде безразмерных комплексов Эйлера и Рейнольдса;

- установленные периоды полного и частичного насыщения теплового агента, а также полученная зависимость для определения значения кинетического коэффициента “ η ” для измельченных стеблей хлопчатника;

- зависимости для расчета времени достижения критической влажности, времени сушки в периоде частичного насыщения теплового агента и расчетное уравнение для определения общего времени фильтрационной сушки измельченных стеблей хлопчатника от начального до конечного влагосодержания;

- уравнения для определения коэффициента теплоотдачи в зависимости от скорости движения теплового агента через сухой слой и коэффициентов тепло- и массоотдачи через влажный слой измельченных стеблей хлопка при фильтрационной сушке;

- методика и порядок расчета, проектирования и эксплуатации промышленных фильтрационных сушильных установок для сушки измельченных стеблей хлопчатника.

1 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ПЕРЕРАБОТКЕ ОТХОДОВ РАСТИТЕЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Переработка и утилизация сельскохозяйственных отходов, с получением целевого продукта, являются актуальными задачами в сложившихся экономических условиях в мире. Решение указанных задач позволяет уменьшить долю применения традиционных источников в государственном и частном секторах, что способствует повышению энергоэффективности экономики государства.

Истощение природно-сырьевых ресурсов и возникающие при этом проблемы приводят к поиску возможности разработки новых материалов, изделий и конструкций, которые могут быть получены на основе отходов производства, а также вторичных ресурсов. При этом желательны минимальные издержки при получении этих материалов.

В условиях энергетического и экономического кризиса, для развития промышленности, перспективным является использование альтернативных видов сырья из местных растительных ресурсов, значительное количество в общем объеме которых составляют сельскохозяйственные отходы [6, с.29].

Древесно-растительным отходам (ДРО) относятся все многообразные органические вещества, образующиеся в результате жизнедеятельности деревьев и растений. ДРО являются все вещества, из которых состоят листья, хворост, недревесневевшие побеги, сучья, ветви, вершины, ствол дерева, кора и корневая система, солома, лузга и другие [17].

Отходы древесно-растительного сырья следует рассматривать как вторичные материальные ресурсы. В промышленности используют следующие виды отходов:

- в деревообрабатывающей промышленности – стружки, опилки, дрова, сучки, ветки, древесная пыль;
- гидролизной – лигнин (вторичный отход деревообработки);
- в масложировой – шелуха хлопковых семян;
- в зерно – обрабатывающей – шелуха и солома злаковых;
- при обработке лубяных культур – костра льна, кенафа;
- отходы сельского хозяйства – стебли хлопчатника, кукурузы, подсолнечника, табака, виноградная лоза и другие [18].

Сельскохозяйственные виды отходов могут являться дополнительным сырьем при производстве различных материалов, изделий и конструкций. Применение таких видов отходов может привести к снижению себестоимости новых разрабатываемых материалов, а также к значительной экономии общественного труда, в результате чего будет и экономия, как топливно-энергетических ресурсов, так и капитальных вложений. Из этого следует, что проблема рационального использования сельскохозяйственных отходов при производстве материалов относится к актуальной, в особенности для стран, имеющих аграрную направленность. Необходимо отметить, что применение отходов растительных ресурсов при производстве строительных материалов

имеет преимущество, касательно направления снижения веса, а также повышения качества этих материалов.

1.1 Переработка отходов растительного происхождения с целью получения материалов широкого потребления

В настоящее время ископаемые виды топлива, такие как нефть, уголь и природный газ, являются основными источниками энергии в мире. Однако ожидается, что эти источники энергии истощатся в течение следующих 40-50 лет. Более того, ожидаемые экологические убытки, такие как глобальное потепление, кислотные дожди и городской смог из-за выбросов из этих источников, побудили мир попытаться сократить выбросы углерода на 80% и перейти к использованию различных возобновляемых источников энергии (ВИЭ), которые менее вредны для окружающей среды, таких как солнечная энергия, ветер, биомасса и т.д. устойчивым способом. Биомасса - один из самых ранних источников энергии с очень специфическими свойствами.

В обзоре [19] были исследованы несколько аспектов, связанных со сжиганием биомассы в котлах, таких как состав биомассы, оценка более высокой теплотворной способности биомассы, сравнение биомассы с другими видами топлива, сжигание биомассы, совместное сжигание биомассы и угля, воздействие биомассы, экономический и социальный анализ биомассы, транспортировка биомассы, уплотнение биомассы, проблемы биомассы и будущее биомассы. Было обнаружено, что использование биомассы в котлах дает множество экономических, социальных и экологических преимуществ, таких как чистая экономия финансовых средств, сохранение ресурсов ископаемого топлива, создание рабочих мест и сокращение выбросов CO₂ и NO_x. Однако следует уделять внимание другим экологическим воздействиям биомассы, таким как земельные и водные ресурсы, эрозия почв, утрата биоразнообразия и обезлесение. Загрязнение, сбыт, низкая теплотворная способность, хранение, сбор и обработка - все это проблемы, связанные с сжиганием биомассы в котлах. Будущее использования биомассы зависит от развития рынков ископаемого топлива и решений, касающихся рынка биомассы.

Пиролиз биомассы - это процесс, посредством которого сырье из биомассы термически разлагается в отсутствие воздуха/кислорода. Он используется для производства твердых (древесный уголь), жидких (смола и другие органические вещества) и газообразных продуктов. Эти продукты представляют интерес, поскольку они являются возможными альтернативными источниками энергии. Изучение пиролиза приобретает все большее значение, поскольку это не только самостоятельный процесс, но и первый шаг в процессе газификации или сжигания и имеет много преимуществ по сравнению с другими возобновляемыми и традиционными источниками энергии. Несколькими исследователями были проведены исследования по пиролизу биомассы и других веществ [20-24]. Фактическая схема реакции пиролиза биомассы чрезвычайно сложна из-за образования более сотни промежуточных продуктов. Моделирование пиролиза включает модель химической кинетики,

модель теплопередачи и модель массообмена. Различные кинетические модели, модели тепломассообмена, описанные в литературе, представлены в настоящем обзоре с экспериментальными подтверждениями, чтобы обеспечить текущее состояние исследования [2, с.8]

Процесс пиролиза проводится при температуре 400–600°C. С помощью этого процесса можно получить жидкую бионефть, которую можно использовать непосредственно в качестве топлива. По прогнозам по сравнению с другими процессами пиролиз отличается универсальностью, экологичностью и имеет высокую эффективность [23, с.70]. Пиролиз биомассы с экономической точки зрения является перспективной технологией для разработки и исследований [24, с.89].

Для углубленного изучения процесса пиролитической полигенерации на основе биомассы и его механизма был исследован пиролиз стебля хлопчатника в уплотненном слое с акцентом на эволюцию химических и физических структур твердых, жидких и газообразных продуктов. Эволюция характеристик продукта могла бы быть хорошим объяснением технологического механизма пиролиза биомассы. Взаимосвязь между распределением твердых продуктов по порам и системой сплавленных ароматических колец, выявленная с помощью комбинационного анализа, может существовать и нуждается в количественной оценке в ходе дальнейшего изучения. Что касается оптимальных условий для получения высококачественных пиролитических продуктов из системы полигенерации, оптимальная температура составляет 550-750°C с более высокой теплотворной способностью полученного древесного угля (≈ 28 МДж/кг) и большей площадью поверхности (>200 м²/г). Между тем, теплотворная способность газа достигает 8-9 МДж/м³, а жидкое масло будет использоваться в качестве базового продукта в биоочистке [25].

Пиролиз стебля хлопчатника был изучен для определения основных характеристик и количеств жидких и твердых продуктов. Конкретными исследованными переменными были температура (от 400°C до 700°C), размеры частиц (от 0,25 мм до 1,8 мм) и скорость потока газообразного азота (от 50 до 400 см³/мин). Все эксперименты проводились при скорости нагрева 7°C/мин. Результаты показали, что размер частиц и скорость потока азота не оказывали существенного влияния, в то время как температура была очень значительной. Согласно результатам экспериментов, жидкие продукты могут быть использованы в качестве жидкого топлива, тогда как твердые продукты могут быть преобразованы в активированный уголь для процессов адсорбции [26].

В работе [27] представлено подробное исследование как пиролиза, так и газификации стеблей хлопчатника, исследованных с использованием термогравиметрического анализатора и реактора с неподвижным слоем. При проведении экспериментов по пиролизу при различных скоростях нагрева в диапазоне 5-30 К/мин в инертной среде, установлено, что реакции пиролиза зависят от условий эксплуатации и химического состава. Кинетика выделения газа в процессе пиролиза и образование смолы также изучена в специально разработанном реакторе с неподвижным слоем. Эксперименты по газификации

CO₂-угля при температурах в диапазоне 973-1123 К, показали, что реакция газификации угля зависит от площади поверхности угля и содержания неорганических веществ в биомассе.

А в работе [28] биомасса стеблей хлопчатника была первоначально охарактеризована для понимания ее физико-химических свойств в качестве сырья для производства биоугля. Кроме того, был проведен термический анализ с использованием термогравиметрического анализа (TGA), и результаты были дополнительно использованы для оценки кинетического поведения стебля хлопчатника при термическом разложении в инертной среде. На основе дифференциального изоконверсионного метода были получены кинетические прогнозы в изотермических условиях. Прогнозы дают ценную информацию разработчикам проектов биоугля промышленного масштаба в отношении оптимизации производительности производства. Кроме того, полученные кинетические параметры могут быть использованы при моделировании процесса.

Стебли хлопка как дешевое сырье по сравнению с древесными источниками могут быть использованы для производства древесностружечных плит, которые могут соответствовать требуемым стандартам. В исследовании [29] были изучены водопоглощение, набухание по толщине, прочность на изгиб и свойства внутреннего сцепления древесностружечных плит, изготовленных из стеблей хлопка, при различных уровнях добавления смолы и диапазонах плотности. Было установлено, что древесностружечные плиты, произведенные в диапазоне плотности 0,60–0,70 г/см³, обладают технологическими свойствами, приемлемыми для стандартов.

Поиск нового сырья перешел к возможному использованию однолетних растений, таких как багасса, бамбук, стебли подсолнечника, рисовая шелуха, банан и масличная пальма. В предыдущих исследованиях было отмечено, что волокно из стеблей хлопчатника аналогично обычным видам волокон лиственных пород [30]. Следовательно, это было бы подходящим сырьем для производства древесностружечных плит. Были оценены различные физические и тепловые свойства измельченных и молотых стеблей хлопчатника. Содержание влаги в измельченном и молотом стебле хлопчатника составляло 10,01 и 12,31% соответственно. Размер измельченного стебля хлопчатника составлял 40,3 мм, тогда как эквивалентный диаметр измельченного и молотого стебля хлопчатника оценивался в 30,5 и 4,5 мм соответственно. Среднее значение насыпной плотности измельченных и молотых стеблей хлопчатника составляло 206,16 и 217,30 кг/м³, тогда как истинная плотность варьировалась от 727,70 до 313,60 кг/м³. По оценкам, пористость измельченных стеблей хлопчатника была больше, чем у молотых стеблей хлопчатника [31]. Здесь же приведены углы откоса для измельченных и молотых стеблей хлопчатника, которые составляли 43,18⁰ и 34,35⁰, соответственно. Коэффициент внутреннего трения для измельченных стеблей хлопчатника составлял 0,85, тогда как коэффициент внешнего трения для измельченных и молотых стеблей хлопчатника оценивался в 0,54 и 0,68, соответственно. Теплотворная

способность измельченных и молотых стеблей хлопчатника составила 16,70 и 16,79 МДж/кг соответственно. Содержание золы как в измельченных, так и в молотых стеблях хлопчатника было почти одинаковым, т.е. 6,93 и 6,87 %, соответственно.

В статье [32] показаны результаты исследований влажности гуза-паи на важные показатели, в частности, на производительность греющей стенки реактора, а также влияние интенсивности теплового потока на показатели пиролиза. Также были изучены причины, обуславливающие неоднородность поля температур при слоевом пиролизе гуза-паи. Продолжительность работы греющей стенки реактора растет с увеличением интенсивности теплового потока. Эти явления тем заметнее, чем мельче фракции гуза-паи. Причины их лежат в затруднениях конвективного теплопереноса.

Химический состав стеблей хлопка был изучен с целью оценки ее биотехнологического потенциала [33]. Основными компонентами стеблей хлопка, как и в других соломинках, являются углеводы клеточной стенки. По сравнению с зерновой солодкой, стебли хлопка содержит значительно больше растворимых в клетках веществ, но уровень растворимых углеводов низкий, а количество вторичных метаболитов высокое. Клеточная стенка стеблей хлопка содержит меньше гемицеллюлозы и больше пектинового вещества, чем пшеничная солома. Возможно сохранение стеблей хлопка в анаэробных условиях. Однако наблюдалось увеличение уровня лигнина и небольшая потеря растворимых органических соединений во время аэробной ферментации

Как отмечают авторы [34], переработка стеблей хлопчатника в качестве компоста может снизить зависимость от минеральных удобрений. Сообщается о переработке отходов хлопководства в органический навоз. Кроме того, авторы оценили возможность использования микробных консорциумов в качестве обработки семян и изучили их синергический эффект наряду с применением навоза на урожайность хлопка, качество волокна и свойства почвы.

Способность к анаэробной обработке и потенциал образования метана трех различных отходов хлопчатника, а именно стеблей хлопчатника, оболочки семян хлопчатника и хлопкового жмыха, были определены в реакторах периодического действия. Кроме того, также были исследованы эффекты добавок питательных веществ и микроэлементов. С этой целью были проведены эксперименты по биохимическому метановому потенциалу (ВМР) для двух различных концентраций отходов, а именно 30 и 60 г/л. Результаты показали, что хлопковые отходы могут быть обработаны анаэробно и являются хорошим источником биогаза. Приблизительно 65, 86 и 78 мл CH_4 были получены за 23 дня из 1 г стеблей хлопчатника, оболочки семян хлопчатника и хлопкового жмыха в присутствии базальной среды. Добавление базальной среды оказало важное положительное влияние на производство биогаза [35].

Высушенные измельченные стебли хлопчатника пропитывали различными концентрациями фосфорной кислоты (20-85 мас.%), сушили при 383 К и карбонизировали при 773 К в течение 2 ч. Были получены

высокоадсорбирующие углероды с хорошо развитой мезопористостью. Анализ на микропористость доказал наличие незначительного содержания во всех продуктах. Не высушенный пропитанный предшественник давал углерод со значительно меньшей адсорбционной способностью, тогда как карбонизация при 673 К давала углерод со сравнительно более низкими параметрами текстуры [36].

В работе [37] оцениваются сельскохозяйственные отходы и исследуется их использование в качестве источников энергии. Обсуждается процесс преобразования стеблей хлопчатника в полезную энергию. Также представлены результаты опросов, которые были проведены для оценки приемлемости нового топлива пользователями. Были получены обнадеживающие результаты. Было установлено, что брикетирование карбонизированных стеблей хлопка обеспечивает экологически безопасное и социально приемлемое топливо, а также решает проблему утилизации отходов.

Хлопковые культуры производят миллионы тонн лигноцеллюлозных отходов, которые могут быть использованы для производства энергии. Авторы [38] привели энергетическую характеристику и провели оценку брикетов, полученных из различных сельскохозяйственных отходов хлопка для производства электроэнергии. Две разные части, стебель и хлопковая оболочка, были проанализированы по насыпной плотности, непосредственному анализу, более высокой теплотворной способности, содержанию целлюлозы, гемицеллюлозы, белка, жира и лигнина, термогравиметрическому анализу и механической прочности брикета. Результаты энергетической характеристики показали высокий энергетический потенциал, особенно из-за содержания летучих веществ, фиксированного углерода и высокую теплотворную способность. Механическая прочность брикета была выше в образцах, приготовленных из смеси стебля и скорлупы. Наконец, был сделан вывод о том, что отходы хлопка способны генерировать брикеты с хорошими механическими и физико-химическими характеристиками, особенно те, которые образуются из смеси стебля и скорлупы.

Уголь активированный хлоридом цинка и паром были получены из стеблей хлопчатника [39]. Эти углеродные адсорбенты были исследованы для определения их текстуры и способности к адсорбции красителей. Стебли хлопка после измельчения, промывки и сушки также исследовали в качестве дополнительного адсорбента. Активированные угли и обладали большой площадью поверхности и большим общим объемом пор и обладали высоким поглощением красителя.

Исследования показывают на сходство стеблей хлопчатника с древесиной, как по структурному строению, так и по химическому составу; тем самым свидетельствуя о возможной переработки её, как механическим, так и химическим способами. Из стеблей хлопчатника, гуза-пай, возможно получение арболитовых материалов, а из мелких фракций при измельчении, можно получить ДСП. Волокнистая структура гуза-пай позволяет получить такие материалы, как ДВП и разные типы картонов. При применении

специальной технологии возможно получить пластик без использования связующего, а также различные сорта бумаг и т.п.

Технологический процесс изготовления из растительного сырья плитного материала предусматривает следующие этапы: гуза-пая измельчается на дробилке, размером 30-60 мм; далее из измельченной гуза-пай готовят стружку; приготовленную стружку сушат до состояния влажности 5-6%; за-тем предусматривают процесс смешивания массы с клеем. Далее на основе полученной массы формируют «стружечный ковер». В конце всей процедуры предусматривается прессование плиты с нагреванием температуры до 160-180 °С, при давлении 2-3 МПа [40].

Плиточный материал, изготавливаемый из гуза-пай по способу и технологии изготовления, а также его эксплуатация, идентичны плитам, получаемый из древесины, и соответствуют действующим стандартам и другим нормативным документам.

На современном этапе проводятся исследования касательно дальнейшего внедрения новейшей техники и технологий по созданию рациональной технологии, с экономически выгодными показателями, изготовления различных плит растительного сырья, в том числе из стеблей хлопчатника. Была разработана технология получения плитных материалов - ДСП 30 [41]. Следует отметить, что к достоинствам данных плит относятся их относительно низкая плотность, на 13-15% без потери прочности, также меньший расход смолы и относительно низкий износ режущего инструментального материала. Этот материал пригоден для использования в качестве щитов к опалубкам, использован как элементы встроенных шкафов, чистого пола, а также запчастей к дверным полотням. Такой способ привел к экономически выгодным изделиям, так как были соответственно снижены трудовые затраты при их изготовлении, что впоследствии привело к сокращению накладных расходов [42]. Как нормативный документ использовалась технологическая инструкция по разработке однослойных плит из гуза-пай, которая соответствовала действующим техническим условиям, ТУ 1326708-81 «Плиты из гуза-пай для строительства». Этот материал являются конкурентноспособным относительно альтернативных вариантов. Стебли хлопчатника были использованы в качестве заполнителя, при этом добавляли и ракушечный песок.

В республиках Центральной Азии каждый год наблюдается скопление огромного количества стеблей хлопчатника (гуза-пай), остающихся после сбора хлопка-сырца. Хотя в большинстве своем основная часть гуза-пай используется на местностях в виде топлива местным населением, оставшаяся часть не всегда находит достаточно эффективного применения, и, кроме того, оказывается дальнейшей проблемой для последующей обработки этих земель.

Таким образом из проведенного обзора можно сделать вывод, что в настоящее время стебли хлопчатника имеют ограниченное применение и в основном сжигаются. Натуральные целлюлозные волокна, полученные из стеблей хлопчатника, состоят примерно из 79% целлюлозы и 13,7% лигнина. Использование стеблей хлопчатника в качестве источника натуральных

целлюлозных волокон дает возможность увеличить доход от выращивания хлопчатника и сделать хлопчатник более конкурентоспособным по сравнению с другими органическими культурами. Кроме того, на основе стеблей хлопчатника можно получить различные строительные материалы, биотопливо в жидком и в брикеттированном виде, активированные угли для использования в промышленности в качестве адсорбентов.

1.2 Анализ существующих технологий сушки древесных материалов и видов оборудования

Сушка — это процесс термического удаления летучих веществ (влаги) с получением твердого продукта. Влага, содержащаяся в свободной химической комбинации, присутствующая в виде жидкого раствора внутри твердого вещества или даже захваченная в микроструктуре твердого вещества, которая оказывает давление пара меньше, чем у чистой жидкости, называется связанной влагой. Влага, превышающая связанную влагу, называется несвязанной влагой [13, с.4].

Когда влажное твердое вещество подвергается термической сушке, одновременно происходят два процесса:

1. Передача энергии (в основном в виде тепла) из окружающей среды для испарения поверхностной влаги;
2. Перенос внутренней влаги на поверхность твердого вещества и ее последующее испарение за счет первого процесса.

Влажность стеблей хлопка в послуборочный период составляет 60-70%, а для изготовления материалов предварительно измельченные стебли необходимо высушить до влажности 6-12%. Технологические линии для производства материалов из органического растительного сырья оснащают ленточными, барабанными сушилками, а также аппаратами кипящего слоя, однако они являются громоздкими, часто характеризуются низкой интенсивностью протекания тепло - и массообменных процессов, требующих установки очистного оборудования. Известно, что удельные энергозатраты на реализацию процессов сушки в два - три раза выше, чем на прессование топлива и в десять раз превышают последние на стадии измельчения сырья. Очевидно, что важной задачей является совершенствование существующих и внедрение в производство новых типов сушилок.

В работе [43] разработана конструкция сушилки, в которой используется низкосортное отходящее тепло в качестве источника тепла. Результаты работы показывают, что конструкция сушилки является надежным и подходящим для сушки кукурузной соломы. Такая конструкция также может быть применена к разнообразной биомассе, такой как стебель хлопчатника, рисовая солома, пшеничная солома и др.

Сухая биомасса обеспечивает значительные преимущества при сжигании, такие как повышение эффективности котла, снижение выбросов дымовых газов и улучшение работы котла по сравнению с топливом с высокой влажностью. Однако сушка - это энергоемкая предварительная обработка. Использование низкосортного отработанного тепла, большое количество которого имеется во

многих отраслях обрабатывающей промышленности, может значительно снизить потребление энергии. Была исследована [44] интеграция процесса сушки в топливную систему электростанции. В качестве источника тепла для сушки использовалось отходящее тепло от завода перерабатывающей промышленности (мощность 100 МВт). Биомасса, сосновая щепа с влажностью 60 мас. %, была высушена и затем могла быть использована в качестве исходного топлива для последующей электростанции мощностью 40 МВт. Процесс состоял из ленточного конвейера в качестве сушилки и либо дымовых газов, либо перегретого пара (образующегося из горячей охлаждающей воды) в качестве источника тепла.

В работе [45] были проведены различные исследования для оценки производительности роторной сушилки для сушки сельскохозяйственной продукции. Обсуждаются преимущества и проблемы роторных сушилок при сушке сельскохозяйственной продукции, влияние свойств продукта и сушильного воздуха, а также конструктивных и эксплуатационных параметров сушилки на производительность сушилки и качество продукции. Роторные сушилки способны перерабатывать различные сельскохозяйственные продукты с широким спектром теплофизических и текучих свойств. Роторные сушилки использовались для сушки зерна, бобов, орехов, овощей, трав, древесной биомассы, кормов для животных, сельскохозяйственных отходов и побочных продуктов. В этом обзорном документе обобщаются достижения в области применения роторных сушилок для сушки различных сельскохозяйственных продуктов и приводятся результаты исследований по использованию роторных сушилок для повышения эффективности процесса сушки.

Технологии термической сушки привлекли значительные усилия в области исследований и разработок в связи с растущим спросом на улучшение качества продукции и снижение эксплуатационных расходов, а также снижение воздействия на окружающую среду. Сушильные материалы могут быть в виде влажного твердого вещества, жидкости, суспензии или пасты, которые требуют сушки для продления срока хранения, удобства транспортировки и последующей обработки для получения продуктов с добавленной стоимостью. Большинство из этих материалов чувствительны к нагреву и требуют тщательной сушки, обычная сушка горячим воздухом может отрицательно сказаться на сохранении биоактивных ингредиентов. Высокая температура имеет тенденцию повреждать и денатурировать продукт, разрушать активные ингредиенты, вызывать отверждение корпуса и изменение цвета и т.д. В статье [46] кратко излагаются некоторые из новых методов сушки и избранные последние разработки, применимые к послеуборочной обработке. К ним относятся: сушка с помощью теплового насоса с многорежимным и изменяющимся во времени подводом тепла, сушка перегретым паром при низком и атмосферном давлении, сушка в модифицированной атмосфере, периодическая периодическая сушка, осмотическая предварительная обработка, сушка в микроволновом вакууме и т.д.

Эксперименты по сушке стеблей хлопчатника при различных температурах сушки и различном начальном содержании влаги проводились с использованием микроволнового реактора [47]. Результаты показывают, что в условиях микроволновой сушки содержание влаги в стебле хлопка быстро снижается и также достигается глубокое высушивание. Между тем удельная площадь поверхности стебля хлопчатника может быть значительно увеличена, а структура пор становится более обильной.

Микроволновая вакуумная сушка экструдированных стеблей хлопка была математически сформулирована с помощью динамической модели, теоретически проанализирована и экспериментально оценена авторами работы [48]. Было исследовано влияние условий сушки, включая плотность микроволновой мощности, давление, время сушки и содержание влаги, на поведение при сушке. Результаты расчетов показывают, что плотность микроволновой мощности, содержание влаги и давление оказывают существенное влияние на свойства сушки. В частности, сушка экструдированных стеблей хлопка, начиная с влажности 100% и отчетливо проходя ускоренную и замедленную стадии скорости сушки, занимала 9-16 минут и была намного быстрее, чем сушка горячим воздухом. При снижении давления до 60 кПа время высушивания уменьшается, что сопровождается увеличением скорости высушивания. Было установлено, что модель динамического уравнения Пейджа наилучшим образом описывает микроволновую вакуумную сушку экструдированных стеблей хлопка.

Проведенный обзор литературных источников показывает, что сушку растительного сырья реализуют, используя конвективный, кондуктивный, вакуумный, сублимационный методы и метод сушки в СВЧ-поле. Конвективный метод сушки является наиболее распространенным в промышленных условиях и является целесообразным для реализации обезвоживания растительного сырья с целью дальнейшей переработки. Указанный метод связан с необходимостью перемещения больших объемов высокотемпературного теплового агента, однако невысокие значения коэффициентов теплоотдачи от газообразного теплового агента до влажного сырья не обеспечивают однородного температурного поля даже в тонких слоях высушенного сырья, тепловой агент частично отдает свое тепло влажному материалу и частично насыщается влагой. Поэтому реализация сушки этим методом связана со значительными потерями тепловой энергии с отработанным сушильным агентом, особенно при сушке материалов с повышенной влажностью [49, 50]. Поскольку конвективная сушка является долгим и энергозатратным [51], то перспективным является использование комбинированных способов сушки – конвективного в сочетании с другими способами.

Кондуктивный способ сушки [52], при котором теплота к органическому сырью передается за счет непосредственного контакта нагретой поверхности элементов сушилки является менее распространенным. Такой метод реализуется в паровых сушилках, в которых материал, соприкасается с горячей

поверхностью труб, внутри которых циркулирует пар. Такие сушилки, в основном, используют для сушки зерна и являются громоздкими, энергозатратными, не обеспечивают равномерность сушки.

Для сушки термолабильного растительного сырья, которое по условиям высокотемпературного воздействия, теряет пищевую и биологическую ценности в промышленных условиях применяют вакуумный [53, 54], сублимационные [55, 56] методы, а также метод сушки в СВЧ-поле [54, с.12, 57]. Применение указанных методов сушки позволяет получить продукты высокого качества для последующего их применения в пищевой или фармацевтической отраслях. В частности, вакуумный метод позволяет проводить сушку при значительно более низких температурах теплового агента, во время СВЧ-обработки растительного сырья снижается биологическая активность протоплазмы, в результате чего клеточный сок выходит в межклеточную среду, что существенно сокращает продолжительность процесса, сублимационный способ сушки обеспечивает высококачественную сушку сырья с сохранением ценных компонентов вследствие перехода влаги из твердого состояния в газообразный. Однако, указанные методы являются энергозатратными, особенно имеют высокие энергетические затраты во время периода спадающей скорости сушки. Однако, на основе сочетания указанных методов с основными методами сушки создано много новых комбинированных методов сушки, широкое распространение из которых получил комбинированный способ СВЧ-сушки (микроволнового) и конвективной сушки. Указанный способ дает возможность быстрого удаления влаги, выпаренной под действием микроволнового излучения, что значительно интенсифицирует процесс сушки и обеспечивает получение продукта высокого качества. С другой стороны, указанный комбинированный метод сушки имеет более высокие капитальные и эксплуатационные расходы, по сравнению с конвективным способом [58]. С энергетической точки зрения, использование этого метода целесообразно в двух основных режимах: интенсификация – когда содержание влаги в сушильном агенте достигает своей критической точки и фронт выпаривания начинает перемещаться в горячий воздух; досушивание – когда содержание влаги в материале настолько низкий, что конвективная сушка является неэффективной. Третий возможный режим заключается в использовании микроволнового поля для подогрева материала перед сушкой.

По сравнению с другими методами сушки, микроволновая сушка имеет ряд преимуществ, таких как равномерная энергия и высокая теплопроводность к внутренней части материала, экономия энергии, быстрые условия запуска и выключения. Микроволновая сушка также сокращает время высыхания. В настоящее время микроволновая сушка не применяется при сушке экструдированного стебля хлопка из-за отсутствия соответствующих исследований, таких как математическое моделирование процесса сушки, эффективная диффузия влаги и энергия сушки [59].

Авторы работы [60] исследовали характеристики при сушке стебля хлопчатника при четырех температурах (60, 80, 100 и 120°C) с использованием

одновременного термоанализатора (TG-DSC). Тепловые потребности стебля хлопчатника во время сушки были рассчитаны в диапазоне от 189 до 406 кДж/кг. Значения эффективной диффузионной способности варьировались от $4,38 \cdot 10^{-9}$ до $8,15 \cdot 10^{-9}$ м²/с, а энергия активации была рассчитана как 11,6 кДж/моль. Следовательно, использованная модель Мидилли-Кучука показала наилучшее соответствие экспериментальным данным по сушке.

На основе проведенного анализа литературных источников по оборудованию для реализации процессов сушки растительного сырья, можно сделать вывод, что такое оборудование является весомым потребителем топливно - энергетических ресурсов. Сушилки, которыми оснащают технологические линии производства в настоящее время, являются энергоемкими, крупногабаритными и требуют больших капитальных затрат. Несовершенство сушильного оборудования отражается на качестве готовой продукции, создает дополнительные технологические трудности при соблюдении режимов сушки и приводит к увеличению себестоимости продукта.

Учитывая сложившуюся экономическую ситуацию на рынке, уменьшение энергоемкости производства материалов из измельченных стеблей хлопка может положительно влиять на ценовую политику и конкурентоспособность готовой продукции на мировом рынке. Итак, в настоящее время, возникла потребность в исследованиях, направленных на усовершенствование существующей сушильной техники и разработкой новых менее энергоемких методов сушки и оборудования для их реализации с одновременным обеспечением научно обоснованных параметров проведения процесса.

Одним из вариантов уменьшения энергетических затрат на процесс сушки является замена существующего сушильного оборудования на сушилки фильтрационного типа. Фильтрационный процесс сушки реализуется путем фильтрации теплового агента через слой материала, является одним из высокоинтенсивных методов высушивания, преимуществами которого являются: наличие периода механического вытеснения свободной влаги (для некоторых материалов составляет до 70%) [61]; снижение затрат тепловой и электрической энергии на процесс, обусловленный возможностью использования теплового агента с низким температурным потенциалом с одновременным обеспечением высоких коэффициентов тепло - и массотдачи вследствие подачи сушильного агента через слой, что обеспечивает наилучшие условия межфазного теплообмена; увеличение скорости сушки; улучшение качественных показателей высушенных материалов [62-65]. Фильтрация теплового агента через слой дисперсного материала в направлении сверху вниз позволяет практически полностью исключить вынос тонких фракций из слоя материала подвижным тепловым агентом. Поэтому, данный метод может быть рекомендован для высушивания измельченных стеблей хлопка и позволяет уменьшить энергозатраты технологического процесса изготовления материалов из такого вида сырья. Однако, эффективное применение метода фильтрационной сушки для обезвоживания измельченных стеблей хлопка,

которые характеризуются высоким начальным влагосодержанием и полидисперсностью, разнообразием формы частиц и их структуры, обусловленной многослойным тканевым строением стеблей, является возможным только при условии научно-обоснованных режимов сушки и параметров проведения процесса, которые бы обеспечивали, соответственно, высокие показатели тепло - и массообмена, а также незначительную продолжительность процесса сушки. Поэтому возникает необходимость теоретических исследований гидродинамики фильтрации теплового агента через стационарные слои разнообразных дисперсных материалов, особенностей теплообмена, кинетики процесса с учетом диффузионного массопереноса при сушке. Проведение вышеперечисленных теоретических исследований будет способствовать установлению научно обоснованных режимов сушки и параметров проведения процесса фильтрационной сушки измельченных стеблей хлопка.

1.3 Гидродинамика процесса фильтрационной сушки измельченных материалов

Важным этапом изучения фильтрационного процесса сушки дисперсных материалов является исследование закономерностей изменения гидравлического сопротивления слоя сухого материала от фиктивной скорости движения теплового агента, поскольку они позволяют прогнозировать удельные энергозатраты на создание перепада давлений для обеспечения необходимой скорости движения теплового агента через пористую структуру стационарного слоя материала и таким образом указывают на целесообразность реализации процесса сушки данного материала фильтрационным методом.

Гидродинамика движения теплового агента через стационарный слой материала в значительной мере определяет интенсивность фильтрационной сушки, поскольку режим омывания внешней поверхности частиц тепловым агентом определяет толщину ламинарного пограничного слоя, который лимитирует процессы тепло - и массопереноса влаги.

Гидродинамика движения газового потока через стационарный слой дисперсного материала представляет собой смешанную задачу гидродинамики, однако теоретических сведений для описания указанной задачи в настоящее время не существует [66]. Как свидетельствует анализ литературных источников [67-71], на потери давления в слое дисперсного материала во время фильтрации теплового агента через последний, имеют весомое влияние гранулометрический состав дисперсного материала, структурное строение и форма частиц, высота слоя материала, а также скорость фильтрации теплового агента, плотность и вязкость последнего. Авторами работы [66, с.90] рассматриваются внешняя и внутренняя задачи гидродинамики: внешняя – когда определяющее влияние на потери давления имеют размеры и форма частиц, которые омывает газовый поток; внутренняя – когда определяющими являются размеры, форма, поперечное сечение каналов, сквозь которые движется газовый поток в слое дисперсного материала.

Движение теплового агента в слое дисперсного материала можно описать с помощью уравнений Навье-Стокса при соответствующих граничных условиях, однако применять последние для решения практических задач фильтрационной сушки дисперсных материалов трудно в связи со сложностью формулирования начальных и предельных условий [72]. Указанные уравнения с помощью теории подобия можно привести к безразмерному виду и получить критериальные уравнения, в которые входят инварианты физического подобия: критерий Эйлера (Eu), Рейнольдса (Re), Фруда (Fr), гомохромности (Ho), геометрического подобия (Γ).

$$f(Eu, Re, Fr, Ho, \Gamma) = 0. \quad (1.1)$$

Количественное влияние вышеуказанных определяющих критериев на ход процесса является неодинаковыми. Влиянием критериев гомохромности (Ho) и Фруда (Fr) можно пренебречь, учитывая установленность движения теплового агента и незначительное влияние силы тяжести на потери давления. Критерий геометрического подобия (Γ) (геометрический симплекс) характеризует структурное строение слоя материала и геометрические размеры аппарата; критерий Рейнольдса – влияние сил вязкости на движение теплового агента. Поскольку в критерий Эйлера входит значение перепада давлений и он является определяющим, то уравнение можно представить в виде степенной функции:

$$Eu = A \cdot Re^{-x} \cdot \Gamma^{-y}, \quad (1.2)$$

или

$$Eu = A \cdot Re^{-x} \cdot \left(\frac{H_e}{d_e} \right)^y, \quad (1.3)$$

где H_e – эквивалентная длина канала, по которому движется тепловой агент, который равен $H_e = 1,5 \cdot H$, здесь H – высота слоя дисперсного материала [73], м;

d_e – эквивалентный диаметр каналов, через которые движется тепловой агент, м.

Значение коэффициента “А” и показателей степени “х” и “у” находят путем обобщения результатов экспериментальных исследований. Для определения коэффициента “А” и показателей степени “х” и “у” результаты экспериментальных исследований представляют в виде зависимости критерия Эйлера от геометрического симплекса $Eu = f(H/d_e)$.

Авторами работ [74-77] проведено обобщение экспериментальных данных гидродинамики фильтрации теплового агента через стационарный слой разнообразных дисперсных материалов в виде обобщенного критериального уравнения (1.3) и определены неизвестные коэффициенты “А” и показатели степеней “х” и “у” этих уравнений, а именно:

-для «энергетической» ивы [74, с.6]:

$$Eu = 36 \cdot Re^{-0,22} \cdot \left(\frac{H}{d_e} \right) \quad (1.4)$$

-для мелкодисперсных железосодержащих материалов [75, с.8]:

$$Eu = 710 \cdot Re^{-0,77} \cdot \left(\frac{H}{d_e} \right)^{0,92} \quad (1.5)$$

-для сырьевых материалов производства шлакового гравия [76, с.7]:

$$Eu = 555 \cdot Re^{-0,7} \cdot \left(\frac{H}{d_e} \right)^{0,9} \quad (1.6)$$

-для зерна пшеницы [77, с.9]:

$$Eu = 45 \cdot Re^{-0,42} \cdot \left(\frac{H}{d_e} \right)^{0,9} \quad (1.7)$$

Зависимости, полученные на основе уравнения (1.3) и представленные в этих работах, для измельченных стеблей хлопка использовать нельзя, поскольку константы “А” и показатели степеней “х” и “у” имеют свои значения для каждого материала при определенных режимах фильтрации газового потока, поэтому для получения таких зависимостей для вышеуказанного материала, отличающийся от предыдущих материалов структурным строением слоя необходимо провести дополнительные исследования при определенных режимах движения газового потока и, путем обобщения результатов, определить значение коэффициента “А” и показателей степеней “х” и “у”.

Другим способом описания гидродинамики движения газового потока через стационарный пористый слой материала является использование зависимости Дарси-Вейсбаха [78,79]:

$$\Delta P = \lambda_1 \cdot \frac{H_e}{d_e} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2}, \quad (1.8)$$

где λ_1 – коэффициент сопротивления слоя; H_e – эквивалентная длина каналов, по которым движется поток газа, м; d_e – эквивалентный диаметр, м; ρ – плотность газового потока, кг/м³; v – истинная скорость движения среды, м/с.

Основной проблемой использования зависимости (1.8) для определения потерь давления в слое материала является неизвестное значение коэффициента сопротивления слоя. Для определения коэффициента сопротивления в технической литературе предлагается большое число расчетных зависимостей, полученных путем обобщения экспериментальных результатов для различных по размерам и форме дисперсных материалов и различных режимов фильтрации газового потока. В общем случае коэффициент трения можно представить как функцию числа Рейнольдса в виде [72, с.414]:

$$\lambda = \frac{A}{Re} + B, \quad (1.9)$$

где “А” и “В” – опытные коэффициенты, которые определяют экспериментальным путем.

Одним из способов расчета гидравлического сопротивления в слое дисперсного материала при движении теплового агента через него, является приведение зависимости (1.8) до модифицированного уравнения Эргуна:

$$\Delta P = A \cdot \frac{\mu \cdot a^2}{32 \cdot \varepsilon^3} \cdot N_e \cdot v_0 + B \cdot \frac{\rho \cdot a}{8 \cdot \varepsilon^3} \cdot N_e \cdot v_0^2, \quad (1.10)$$

где A и B – опытные коэффициенты, которые определяются экспериментально; μ – коэффициент динамической вязкости газового потока, Па·с; a – эффективная удельная площадь поверхности всех частиц неподвижного слоя дисперсного материала, омываемого потоком газа, м²/м³; ε – доля пустот на единицу объема неподвижного слоя дисперсного материала (пористость), м³/м³; v_0 – фактивная скорость фильтрации газа, м/с.

Для определения неизвестных коэффициентов “А” и “В” в зависимости (1.10), результаты исследований представляют в виде $\Delta P / (H \cdot v_0) = f(v_0)$. За отрезком, который отсекает прямая на оси ординат определяют неизвестный коэффициент “А”, учитывающий влияние вязкостных сил и коэффициент “В” – с тангенсом угла наклона кривой к оси абсцисс и который учитывает влияние инерционных сил.

Авторами работ [68, с.205; 80-82] для расчета потерь давления в определенных слоях сухих дисперсных материалов при фильтрации теплового агента через последние было применено модифицированное уравнение Эргуна (1.10). Экспериментальные исследования, которые легли в основу описания гидродинамики согласно указанной зависимости, проводились в аппаратах с заданными геометрическими характеристиками при определенных режимах движения теплового агента. Поэтому, представленные в работах расчетные зависимости для описания гидродинамики процесса фильтрационной сушки справедливы для конкретных материалов, в случае соблюдения аналогичных геометрических характеристик аппаратов, в пределах указанных скоростей движения теплового агента, в других случаях их использование является ограниченным из-за большого расхождения теоретических и экспериментальных значений.

В литературе [72, с.512] зависимость (1.10) с учетом коэффициентов “А” и “В” представляют в виде:

$$\lambda = \frac{133}{\text{Re}} + 2,34. \quad (1.11)$$

Зависимость (1.11) является справедливой для определения коэффициента гидравлического сопротивления во время движения теплового агента (в пределах трех режимов) сквозь слои дисперсных материалов, которые состоят из частиц правильной формы. Однако, она не дает достаточной точности для определения коэффициента гидравлического сопротивления при движений теплового агента через слои полидисперсных материалов, состоящих из частиц неправильной формы, имеют сложную структуру слоя, характеризуется разной степенью перекрытия поверхности частиц, которые омываются тепловым агентом.

Поскольку единой методики определения фактора формы частиц и степени перекрытия поверхности в полидисперсных материалах не существует, то

использование зависимости (1.11) для указанных случаев невозможно из-за большой погрешности между теоретически рассчитанными и экспериментальными значениями.

Для определения коэффициента гидравлического сопротивления в слоях сформированных из частиц цилиндрической формы, авторы [73, с.65] предлагают использовать зависимость:

$$\lambda = \frac{A}{\text{Re}^x}. \quad (1.12)$$

Однако, исходя из формы записи зависимости, можно сделать вывод, что она является справедливой в пределах движения теплового агента в ламинарном режиме и не дает достаточной точности в автомоделной области и во время турбулентного движения последнего.

Как утверждают авторы работ [68, с.206; 80, с.169; 81, с.12; 82, с.54], универсальных расчетных зависимостей, которые было бы можно использовать для любых полидисперсных материалов не существует, поэтому для каждого дисперсного материала необходимо экспериментально определять неизвестные коэффициенты в уравнениях (1.9) или (1.12).

Существуют зависимости для определения коэффициентов сопротивления, полученные путем применения критериальных уравнений, для слоев «энергетической» ивы [74, с 11], шлака, глины и сырцовых гранул [76, с.8], гранулированного крупнопористого силикагеля [83], которые характеризуются высокой точностью для указанных материалов, но для измельченных стеблей хлопка эти зависимости использовать невозможно из-за большого различие формы и размеров частиц.

Коэффициент гидравлического сопротивления λ можно определить иным образом, беря за основу зависимость (1.8) и выразив составляющую

$\frac{\Delta P \cdot \varepsilon_{cl}^2}{\rho \cdot v_0^2}$ как критерий Эйлера:

$$\frac{\Delta P \cdot \varepsilon_{cl}^2 \cdot d_e}{\rho \cdot v_0^2 \cdot H} = Eu \cdot \frac{d_e}{H} = \frac{\lambda}{2} = f(\text{Re}), \quad (1.9)$$

откуда

$$\lambda = 2 \cdot \frac{d_e}{H} \cdot Eu = f(\text{Re}). \quad (1.10)$$

На основе проведенного анализа источников литературы можно сделать вывод, что зависимостей для определения коэффициента сопротивления движения теплового агента через слой измельченного материала, который бы был аналогичным слою, сформированному из измельченных стеблей хлопка по гранулометрическому составу, форме и структуре частей не существует, поэтому исследование гидродинамики стационарного слоя измельченных стеблей хлопка является актуальной задачей.

1.4 Тепломассообмен при фильтрации теплового агента через стационарные слои измельченных материалов

Процессы сушки измельченных материалов, на основе применения различных методов обезвоживания, часто характеризуются значительными энергозатратами и продолжительностью. Во время реализации процессов сушки измельченных материалов, тепловой агент отдает свое тепло влажным частицам материала, насыщается влагой и, с достаточно высокой температурой, выходит из зоны сушки. Поэтому интенсивность сушки определяется скоростью тепломассообменных процессов между тепловым агентом и частицами материала, что определяет общую продолжительность процесса сушки и энергозатраты на его реализацию. Поэтому, интенсификация процессов тепломассообмена во время сушки измельченных материалов является актуальной задачей на сегодняшний день.

Исследованию процесса теплообмена между твердыми телами и тепловым агентом с использованием различных методов сушки дисперсных материалов посвящен ряд научных работ [84-95]. Процессы тепломассообмена при реализации фильтрационной сушки измельченных материалов являются недостаточно исследованными и изученными по сравнению с процессами тепломассообмена промышленно распространенных методов сушки измельченных материалов. Однако, в научных трудах [66, с.179; 96-101] представлены результаты исследований тепломассообменных процессов при применении фильтрационного метода для обезвоживания дисперсных материалов. Авторами работы [66, с.180] установлено, что при фильтрационной сушке дисперсных материалов происходят ряд процессов:

- теплообмен между тепловым агентом и поверхностью частиц (конвективная передача тепла от теплового агента к поверхности частиц), однако вследствие возможного пересечения, объединения и разветвления каналов по высоте слоя, некоторые из них становятся малопроницаемыми для газового потока определенного перепада давлений, а шероховатые частицы могут образовывать замкнутые зоны, в таких случаях теплообмен может происходить лишь путем теплопроводности частиц;

- вынос поверхностной влаги с поверхности частиц подвижным тепловым агентом (процесс массоотдачи от частиц материала до газового потока);

- перемещение тепла от поверхностей частиц внутрь (благодаря теплопроводности), что вызывает перемещение влаги по порам и капиллярам частиц с середины к их поверхности (диффузионные процессы переноса влаги).

В исследованиях [66, с.130; 95, с.100; 96, с.57; 97, с.25; 98, с.38; 99, с.360; 100, с.115; 101, с.150] подтверждено наличие зонального механизма фильтрационной сушки, который характеризуется наличием периодов полного и частичного насыщения теплового агента влагой. Зона тепломассообмена перемещается в направлении движения теплового агента, поэтому влага, в первую очередь, удаляется из верхних слоев материала, то есть из частиц, которые первыми контактируют с тепловым агентом, а уже позднее влага удаляется из частиц, которые размещаются ниже. Так продолжается до

достижения конечного влагосодержания всех частиц и температуры на их поверхности, близкой к температуре теплового агента. Поэтому в слое материала, в течение длительного времени одновременно находятся сухие и влажные материалы, причем высота слоя сухого материала постоянно растет, а влажного уменьшается.

Учитывая вышесказанное, можно сделать вывод, что для процессов фильтрационной сушки дисперсных материалов важным является проведение исследований процессов теплообмена между тепловым агентом и сухими частицами материала, а также между влажными частицами материала и тепловым агентом. Исследование процессов теплообмена между тепловым агентом и сухими частицами материала позволит учесть количество теплоты, затрачиваемой на нагрев твердых частиц, что приводит к перемещению влаги из их середины к поверхности.

Как было сказано выше, при фильтрационной сушке дисперсных материалов основное количество теплоты частицам передается конвективно и уравнение теплообмена в стационарных условиях можно записать в виде закона Ньютона-Рихмана [102], из которого можно определять значения коэффициентов теплоотдачи α , м²/с от теплового агента к сухим частицам дисперсного материала:

$$\alpha = \frac{\Delta Q}{F \cdot (\bar{t} - \bar{T}_n) \cdot \Delta \tau}, \quad (1.15)$$

где ΔQ – количество теплоты затрачиваемая на нагрев материала, Дж;

F – поверхность всех частиц слоя (поверхность теплообмена), м²;

$\Delta \tau$ – время проведения эксперимента, с;

\bar{t} – среднеарифметическая температура теплового агента на входе и выходе из слоя, К;

\bar{T}_n – средняя температура поверхности частиц, К.

Как исследованы авторами работ [66, с.179; 96, с.57; 97, с.32; 98, с.38; 99, с.361; 100, с.119; 101, с. 149], зависимость коэффициентов теплоотдачи от скорости движения теплового агента и его физических свойств, структуры и размеров поверхности теплообмена, которой при фильтрационной сушке дисперсных материалов выступает слой материала, а также других, менее значимых факторов, является достаточно сложной и на современном уровне науки еще не может быть установлена теоретически. Поэтому, для определения коэффициентов теплоотдачи прибегают к экспериментальным исследованиям, которые позволяют вычислить значения коэффициентов теплоотдачи от теплового агента ко сухим частицам дисперсного материала согласно зависимости (1.15) с последующим обобщением опытных данных с помощью теории подобия.

Для обобщения экспериментальных результатов теплообменных процессов при фильтрации теплового агента сквозь слои сухих полидисперсных материалов на практике удобно использовать обобщенные критериальные

уравнения, которые позволяют рассчитать значения коэффициентов теплоотдачи от теплового агента к сухим частицам материала [103-105]:

$$Nu = f(Re, Pr), \quad (1.16)$$

или в виде степенной зависимости

$$Nu = A \cdot Re^n \cdot Pr^m, \quad (1.17)$$

где: $Nu = \frac{\alpha \cdot d_e}{\lambda}$ – критерий Нуссельта;

$Re_e = \frac{v \cdot d_e}{\nu}$ – критерий Рейнольдса;

$Pr = \frac{\nu}{a}$ – критерий Прандтля;

λ – коэффициент теплопроводности теплового агента, Вт/м·К;

v – действительная скорость фильтрации теплового агента, м/с;

ν – коэффициент кинематической вязкости теплового агента, м²/с;

a – коэффициент температуропроводности теплового агента, м²/с.

Неизвестный опытный коэффициент « A » и показатели степеней « n » и « m » в зависимости (1.17) определяют экспериментальным путем.

В работах на основе обобщения экспериментальных результатов теплообменных процессов во время фильтрации теплового агента через слои различных полидисперсных материалов были получены обобщенные критериальные зависимости:

- для «энергетической» ивы [74, с.15]:

$$Nu = 0,14 \cdot Re_e^{0,8} \cdot Pr^{0,33} \quad ; \quad (1.18)$$

- для мелкодисперсных железосодержащих материалов [75, с.18]:

$$Nu = 1,2 \cdot Re^{0,9} \cdot Pr^{0,33} \cdot \left(\frac{d_{\text{ч.}}}{D_a} \right)^{0,67} \quad ; \quad (1.19)$$

- для сырьевых материалов производства шлакового гравия [76, с.16]:

$$Nu = 2,0 \cdot Re^{0,9} \cdot Pr^{0,33} \cdot \left(\frac{d_{\text{ч.}}}{D_a} \right)^{0,67} \quad . \quad (1.20)$$

Эти критериальные зависимости позволяют определить коэффициенты теплопроводности от теплового агента к сухим частицам различных материалов.

Аналогично, как и для сухого материала, обобщение экспериментальных значений позволило представить зависимость (1.17) для определения коэффициента теплоотдачи в тонком слое материалов с учетом геометрических параметров слоя и аппарата в виде:

- для «энергетической» ивы [74, с.16]:

$$Nu = 0,1 \cdot Re_e^{0,9} \cdot Pr^{0,33} \quad ; \quad (1.21)$$

- для мелкодисперсных железосодержащих материалов [75, с.19]:

$$Nu = 1,62 \cdot Re^{0,9} \cdot Pr^{0,33} \cdot \left(\frac{d_{ч.}}{D_a} \right)^{0,67} \quad ; \quad (1.22)$$

- для сырьевых материалов производства шлакового гравия [76, с.17]:

$$Nu = 1,3 \cdot Re^{0,9} \cdot Pr^{0,33} \cdot \left(\frac{d_{ч.}}{D_a} \right)^{0,67} \quad . \quad (1.23)$$

Для описания процессов тепло и массоотдачи при контактировании подвижного теплового агента с влажными частицами в слое материала, то есть, во время реализации фильтрационной сушки дисперсных материалов, могут быть использованы зависимости:

$$\frac{\Delta W}{\Delta \tau} \cdot r = \alpha \cdot F \cdot \left(\frac{t_{ex.} + t_{вых.}}{2} - t_{m.m.} \right) \quad , \quad (1.24)$$

где: α – коэффициент теплоотдачи от теплового агента к влажным частицам материала, м²/с;

$t_{ex.}$, $t_{вых.}$, $t_{m.m.}$ – соответственно температура теплового агента на входе, выходе из слоя материала и температура мокрого термометра, °С;

$$\frac{\Delta W}{\Delta \tau} = \beta \cdot F \cdot \left(x_{нас.} - \frac{x_{нас.} + x_0}{2} \right) \cdot \rho \quad , \quad (1.25)$$

где: β – коэффициент массоотдачи от теплового агента к влажным частицам материала, м²/с;

x_0 , $x_{нас.}$ – соответственно влагосодержание теплового агента начальное и в состоянии насыщения.

Зависимости (1.24) и (1.25) могут быть использованы для прогнозирования фильтрационной сушки различных дисперсных материалов только когда будут известны значения коэффициентов теплоотдачи α и массоотдачи β . Указанные коэффициенты могут быть найдены только путем проведения экспериментальных исследований.

Обобщение экспериментальных результатов теплообмена во время реализации фильтрационной сушки дисперсных материалов можно провести согласно зависимости (1.17), а массообмена – согласно обобщенной критериальной зависимости, представленной в работе [66, с.194]:

$$Sh_e = A \cdot Re_e^n \cdot Sc^m \quad (1.26)$$

где: $Sh_e = \frac{\beta \cdot d_e}{D}$ – критерий Шервуда;

D – коэффициент диффузии водяного пара в воздух, $\text{м}^2/\text{с}$;

$Sc = \frac{\nu}{D}$ – критерий Шмидта.

Обобщение результатов экспериментальных исследований в виде зависимостей (1.17) и (1.26) позволяет определять коэффициенты теплоотдачи и массоотдачи при фильтрационной сушке дисперсных материалов в широких пределах изменения числа Рейнольдса и прогнозировать затраты тепловой энергии на реализацию сушки и, соответственно, эксплуатационные затраты на этапе проектирования аппаратуры.

Обобщение экспериментальных значений позволило представить зависимость (1.26) для определения коэффициента массоотдачи в тонком слое различных материалов с учетом геометрических параметров слоя и аппарата в виде:

- для «энергетической» ивы [74, с.17]:

$$Sh = 0,1 \cdot Re_e^{0,9} \cdot Sc^{0,33} \quad ; \quad (4.12)$$

- для мелкодисперсных железосодержащих материалов [75, с.20]:

$$Sh = 1,3 \cdot Re^{0,9} \cdot Sc^{0,33} \cdot \left(\frac{d_{\text{ч.}}}{D_a} \right)^{0,67} \quad ; \quad (1.28)$$

- для сырьевых материалов производства шлакового гравия [76, с.18]:

$$Sh = 0,7 \cdot Re^{0,9} \cdot Sc^{0,33} \cdot \left(\frac{d_{\text{ч.}}}{D_a} \right)^{0,67} \quad . \quad (1.29)$$

На основе проведенного анализа источников литературы, можно сделать вывод, что из-за сложности теплообменных процессов, имеющих место при фильтрационной сушке дисперсных материалов, являются невозможными их аналитические описания без проведения экспериментальных исследований зависимостей вида (1.17) и (1.26), которые бы можно было использовать для описания процессов теплообмена между подвижным тепловым агентом и сухими частицами измельченных стеблей хлопка, а также закономерностей тепломассообменных процессов при реализации процессов сушки не существует.

Поэтому исследование особенностей указанных процессов при фильтрации теплового агента сквозь сухие и влажные слои измельченных стеблей хлопка является актуальной задачей.

1.5 Анализ кинетики процесса фильтрационной сушки измельченных материалов

Кинетика процесса сушки в общепринятом варианте определяет изменение влагосодержания материала во времени. На кинетические особенности процессов сушки измельченных материалов в значительной степени имеют

влияние свойства влажных материалов (начальное и конечное влагосодержание, формы связи влаги с твердым скелетом материала), параметры теплового агента (влагосодержание, температура, скорость движения), состояние пребывания материала в зоне сушки (стационарный, кипящий, взвешенный).

Во время реализации сушки измельченных материалов фильтрационным методом фильтрация сушильного агента через слой последних обеспечивает наилучшие условия межфазного теплообмена, поскольку обеспечивается омывание каждой частицы газовым потоком. Поэтому скорости процессов тепло - и массообмена во время фильтрационной сушки измельченных материалов выше, по сравнению с традиционными методами, что позволяет сократить продолжительность сушки и уменьшить энергозатраты. Кроме этого, во время фильтрационной сушки используют низкотемпературный тепловой агент, который позволяет уменьшить энергозатраты на нагрев последнего. Достичь уменьшения энергозатрат во время фильтрационной сушки можно путем настройки параметров процесса на оптимальные режимы работы, при которых энергозатраты являются наименьшими. Для разработки параметров фильтрационной сушки измельченных материалов, которые бы обеспечивали наименьшие энергозатраты на реализацию процесса, необходимым является исследование кинетических особенностей процесса сушки выбранного материала.

Исследованию кинетики фильтрационной сушки посвящены ряд научных трудов. В работах [106-112], авторами исследована кинетика фильтрационной сушки дисперсных материалов, и на основе экспериментальных данных сделаны выводы о влиянии высоты слоя, скорости движения, температуры теплового агента, размера частей на скорость сушки. Однако, полученные авторами зависимости можно использовать только для прогнозирования кинетики фильтрационной сушки исследуемых в этих работах материалов, которые характеризуются определенной формой и структурному строению частиц.

Авторами работ [111, с.15; 112, с.76] исследована кинетика и динамика фильтрационной сушки дисперсных материалов и проанализирована зависимость изменения скорости фильтрационной сушки от технологических параметров теплового агента (сушильного потенциала) и высоты слоя материала. Кинетика сушки влажных материалов исследуется экспериментально, путем нахождения кривой сушки и кривой нагрева [13, с.324; 66, с.141].

В работе [113] методом численного моделирования описан процесс нагрева, сушки и пиролиза крупных частиц древесины, встречающихся в печах. Для поддержания высокой степени гибкости и независимости конкретных свойств материала, кинетики, размеров и формы частиц этот метод основан на наборе одномерных и переходных дифференциальных уравнений сохранения для массы и энергии. Авторы [114] предложили численный метод расчета для моделирования одновременной сушки и пиролиза древесины и биомассы. В

работе [115] исследован процесс сушки “черной щелочи”, побочного продукта целлюлозно-бумажной промышленности. Процесс проводили в атмосфере азота и при температуре от 20 до 300°С. Кинетика сушки в этом случае моделируется с использованием пяти полуэмпирических моделей, поскольку вместе с влагой из “черной щелочи” выделяются также летучие вещества.

Изучена кинетика низкотемпературной сушки хвойных пород древесины [116]. Кинетика в этом случае учитывает классические стадии сушки (псевдооживленный режим, первый и второй периоды падения скорости сушки). В работе [117] исследована кинетика фильтрационной сушки гептагидрата сульфата железа (II) при различных высотах слоя материала и перепадах давления над сухим материалом, т.е. при разных скоростях перемещения термического агента. Авторы [118] определяли коэффициент диффузии, во время фильтрационной сушки зерна, на основе решения дифференциальных уравнений с граничными условиями первого рода. В статье [119] приведены результаты экспериментальных исследований кинетики фильтрационной сушки кукурузной барды, которая ранее доказала свою эффективность при сушке других культур и разнообразных дисперсных материалов. Проанализированы полученные результаты и описаны изменения, происходящие на кривых фильтрационной сушки зависимости от изменения высоты слоя материала и температуры теплового агента. Полученные авторами зависимости можно использовать лишь для прогнозирования кинетики фильтрационной сушки исследуемых в этих работах материалов.

Экспериментальных или теоретических исследований кинетики фильтрационной сушки измельченных стеблей хлопчатника в доступных источниках информации не обнаружено. В настоящее время измельченные стебли хлопчатника высушивают в барабанных сушильных установках, которые являются громоздкими и малоэффективными с точки зрения затрат тепловой энергии. В барабанных сушильных установках происходит сушка материала с образованием мелко дисперсной фракции, которая имеет свойство самовозгараться из-за высокой температуры теплового агента 200-300 °С. Кроме этого, сушильные барабаны нуждаются в очистке отработавших газов от мелкодисперсных частиц в циклонах и тканевых фильтрах, что требует дополнительных капитальных затрат на оборудование.

Тем не менее, приведенные в этих работах исследования касаются конкретных материалов и применить их для других материалов, отличных по структурному строению и форме частиц является невозможным вследствие большой погрешности между экспериментальными и теоретически рассчитанными значениями. Поэтому, исследование кинетики фильтрационной сушки измельченных стеблей хлопка, как объекта исследования, скорости сушки в зависимости от текущего влагосодержания, динамики удаления влаги из слоя материала является актуальной задачей.

1.6 Диффузионный массоперенос при сушке измельченных материалов

Сушка измельченных материалов представляет собой сложный тепломассообменный процесс удаления влаги из материала. Влага в большинстве измельченных материалов находится как на поверхности частиц, так и в середине. По классическому варианту процесса сушки дисперсных материалов в стационарном слое конвективным методом, после удаления влаги с поверхности частиц, что формируют слой, наступает период, когда скорость сушки определяется подводом влаги с середины частиц к их поверхности (внутренне диффузионный процесс переноса влаги). Эта стадия является длительной во времени и лимитирует продолжительность сушки в целом.

В работах [120,121] на основе основательного обзора работ по развитию теории сушки, проведен анализ дифференциальных уравнений, описывающих внутридиффузионные процессы и обобщение результатов исследований, предложены дифференциальные уравнения для описания внутреннего массопереноса в гранулах полимеров вида:

$$\frac{du}{d\tau} = \text{div}(D_e(u, \tau) \cdot \text{grad } u), 0 < x < R, \tau > 0, \quad \text{а зависимость эффективного}$$

коэффициента диффузии от влагосодержания для исследуемых полимеров аппроксимируется зависимостью: $D_e = D_0 \cdot \exp[-bu - (E_{D_0}^* \cdot (1 - du)/(R^* \cdot T))]$. В работе [122] авторами представлены результаты исследований внутридиффузионных процессов в коллоидных капиллярно-пористых материалах, предложена математическая модель процесса переноса влаги и зависимость вида $a_m = x^2 \cdot Fo_{2max} / \tau_{2max}$ для расчета коэффициента диффузии, а также предложено устройство для измерения коэффициента диффузии.

Несмотря на то, что механизм фильтрационной сушки отличается от конвективного и носит зональный характер, при движении теплового агента через слой измельченного материала, зона тепломассообмена постепенно перемещается в направлении движения теплового агента, то есть «слой материала – перфорированная решетка. Зона сухого материала расширяется с увеличением времени фильтрационной сушки. Скорость внешне диффузионных процессов при реализации фильтрационного процесса сушки в значительной степени зависит от толщины диффузионного пограничного слоя, который становится тоньше во время увеличения скорости движения теплового агента через слой материала. При больших скоростях движения теплового агента, толщина пограничного слоя уменьшается и переходит в диффузионный подслой, влияние конвективной диффузии становится несомнее.

Скорость фильтрационной сушки лимитируется внутренне диффузионными процессами переноса влаги с середины частиц к их поверхности. Поскольку во внутреннем массопереносе участвует около пятнадцати различных видов переноса массы и теплоты, то внутридиффузионные процессы являются более сложными и длительными во времени, по сравнению с внешнедиффузионными [66, с.151; 112, с.76]. Следовательно, процесс сушки, помимо основного вида переноса массы путем молекулярной диффузии, характеризуется существованием других, менее весомых типов внутреннего массопереноса, таких как поверхностная диффузия,

диффузия Кнудсена, капиллярный поток, испарение и конденсация, термодиффузия и др.

Авторами работ [123] и [118, с. 361], на основе обобщения экспериментальных исследований, предложены зависимости для расчета коэффициентов диффузии во время фильтрационной сушки гранул шарообразной формы шлакового гравия $D_w^t = D_w^{293} + 2,5 \cdot 10^{-10} \cdot (T - 293)$ и зерна пшеницы (частиц цилиндрической формы) $D_w = D_w^{293} + 0,3 \cdot 10^{-13} \cdot (T - 293)^2 \cdot (w^c)^{-1,8}$.

Несмотря на сложность механизма фильтрационной сушки, представленного в работе [66, с.130], процессы внутридиффузионного и внешнедиффузионного переноса влаги существуют параллельно друг к другу на протяжении длительного времени, то важной задачей является определение эффективного коэффициента диффузии, который суммарно учитывает скорость всех видов диффузии влаги, что имеют место во время реализации процесса фильтрационной сушки и дает возможность описания процесса массопереноса согласно закона Фика.

Незначительное количество научных работ содержит сведения о методах расчета эффективного коэффициента диффузии для процессов сушки материалов растительного происхождения. В работах [124-126] представлены аналитические решения уравнения Фика для различных геометрических форм частей измельченного растительного материала, а именно, для случая "тонкой пластинки" яблок, а также для шарообразной формы при реализации процессов сушки вишен и груш.

Приведенные зависимости справедливы лишь для исследуемых материалов, которые характеризуются внутренней структурой частей с присущей им пористостью, размерами и формой, поэтому применять их для расчета коэффициента внутренней диффузии влаги во время фильтрационной сушки измельченных стеблей хлопка нельзя из-за большого расхождения между экспериментальными данными и рассчитанными по этим зависимостям результатам.

Процессы диффузии во время сушки материалов из измельченного грубостебелевого сырья фильтрационным методом будут характеризоваться определенными особенностями и закономерностями течения, которые определяются, в значительной мере, сложностью структурного строения материала, характером взаимодействия воды с его твердым скелетом, формой и размерами пор, капилляров и самой частицы.

1.7 Постановка задач исследований

Как видно из анализа источников литературы, огромный ресурс биомассы не всегда подлежит рациональной утилизации, отходы сформированные из остатков стеблей хлопка целесообразно использовать в производстве различных материалов, начиная со строительных до твердого топлива.

Анализ энергозатратности технологических этапов производства материалов из грубостебелевого сырья с повышенным влагосодержанием показал, что основные усилия необходимо направить на уменьшение

энергозатрат стадии сушки. Литературный обзор методов сушки растительного сырья и оборудования для их реализации позволил сделать вывод, что фильтрационный метод сушки может быть рекомендован для высушивания измельченных стеблей хлопка, который уменьшает энергозатраты на процесс сушки материалов из такого вида сырья.

Полученные до этого результаты теоретических и экспериментальных исследований гидродинамики, теплообмена и кинетики с учетом диффузионных процессов при фильтрационной сушке являются справедливыми лишь для ранее исследуемых материалов (стебли подсолнечника, пшеница, крупные частицы древесины, измельченная солома ивы) и их использование для измельченных стеблей хлопка является невозможным из-за большой погрешности между теоретически рассчитанными и экспериментальными данными.

Проведенный анализ позволил определить основные направления исследований фильтрационного процесса сушки измельченных стеблей хлопка. К этим направлениям относятся теоретические и экспериментальные исследования гидродинамики, теплообмена, кинетики процесса с учетом диффузионных процессов.

Обобщение результатов экспериментальных и теоретических исследований гидродинамики, кинетики и тепло - и массообмена при фильтрационной сушке измельченных стеблей хлопка, позволит оптимизировать режимные и конструктивные параметры фильтрационной сушильной установки. При исследованиях фильтрационного процесса сушки необходимо учитывать физико-механические свойства и геометрические параметры измельченных стеблей, которые оказывают влияние на процесс. Усовершенствовать методику расчета основных конструктивных размеров разработанной установки и рассчитать оптимальные технологические параметры процесса возможно только после установления вышеперечисленных закономерностей.

В связи с вышеизложенным, для проведения комплексных исследований фильтрационного способа сушки измельченных стеблей хлопка и разработки научно обоснованной методики расчета необходимо выполнение следующих задач:

- определение физико- химических характеристик, гранулометрического- фракционного состава полидисперсной смеси измельченных стеблей хлопка, пористости, плотности и установление формы частиц;
- разработка конструкции фильтрационной установки для сушки измельченных древесных материалов;
- экспериментальное исследование гидравлического сопротивления пористой структуры слоя измельченных стеблей хлопка под воздействием теплового агента и представление результатов экспериментальных зависимостей в виде безразмерных комплексов, определение опытных коэффициентов модифицированного уравнения Эргуна;

- экспериментальное исследование кинетики фильтрационной сушки измельченных стеблей хлопка при изменении скорости и температуры теплового агента и высоты слоя, установление периодов сушки, а также получение зависимости для определения значения кинетического коэффициента “ η ” для измельченных стеблей хлопчатника;

- получение зависимостей для расчета времени достижения критической влажности, времени сушки в периоде частичного насыщения теплового агента и расчетное уравнение для определения общего времени фильтрационной сушки измельченных стеблей хлопчатника от начального до конечного влагосодержания;

- изучение процессов тепломассообмена между тепловым агентом и сухих, а также влажных измельченных стеблей хлопка при фильтрационной сушке и обобщение результатов экспериментальных исследований в безразмерной форме;

- разработка методики и порядка расчета фильтрационной сушильной установки для сушки измельченных стеблей хлопка основанных на полученных результатах, а также рекомендаций по эксплуатации и проектированию;

- испытание результатов исследований в опытно-промышленных условиях и внедрение в промышленности.

2 ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ, ОПИСАНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В Южных регионах Республики Казахстан объем сельскохозяйственных отходов, которыми являются стебли хлопчатника (гуза-пай), за один урожайный год составляет порядка 0,5 млн. тонн. В работах [6, с.30; 127-129], предлагается использовать отходы хлопка –сырца в строительной отрасли в качестве теплоизоляционно-конструкционного материала, таким образом решая проблему утилизации сельскохозяйственных отходов.

В исследованиях по данной тематике [6, с.30; 127, с.30; 128, с.12; 129, с.14], решены проблемы переработки стеблей хлопчатника с целью получения строительных материалов из них. Но, в данный момент нет научно обоснованных исследований физико-химических, физико-технических свойств стеблей хлопка-сырца и мало изучены вопросы их переработки и утилизации, что не позволяет получать качественные материалы из этих отходов [130-132].

В связи с этим, в данной работе с единых теоретических позиций рассмотрена и экспериментально подтверждена целесообразность использования стеблей хлопчатника.

2.1 Основные характеристики стеблей хлопка

Проведены исследования по определению физико-химических, физико-технических и теплофизических свойств стеблей хлопчатника [14, с.110]. На основе вышеизложенного нами подобраны отходы возделывания хлопка, которые являются по своей структуре перспективными материалами для получения основы строительных плит. Основная часть которых, составляет гуза-пая –стебли и корневища растений хлопка -сырца. Огромное количество гуза-пай не перерабатывается и остается не использованной на хлопковых плантациях в странах Центральной Азии и в Южных регионах Республики Казахстан. Только небольшая часть стеблей хлопка-сырца применяется в качестве топлива для бытовых нужд населения. Такие отходы сжигаются непосредственно на местах возделывания хлопчатника, другие способы переработки стеблей хлопка-сырца не нашли широкого практического применения [127, с.30].

С целью определения основных параметров и характеристик объектов исследования, наши исследования были начаты с определения основных характеристик стеблей хлопчатника рыхлой структуры. При переработке важное значение имеет форма частиц материала. Установлено, что измельченные стебли хлопка-сырца состоят из призматических и цилиндрических форм волокон [14, с.107].

Обоснования данного выбора в работе, и соответственно объектом исследования стала гуза-пая, среди всех целлюлозосодержащих органических отходов растительного происхождения, так как в Южно-Казахстанской области они являются наиболее распространенными и основными нереализованными отходами растительного сырья. Также в качестве обоснования выбора гуза-пай

можно отнести тот факт, что они более пригодны по сравнению с другими видами растительного сырья, а также и с другими сельскохозяйственными отходами.

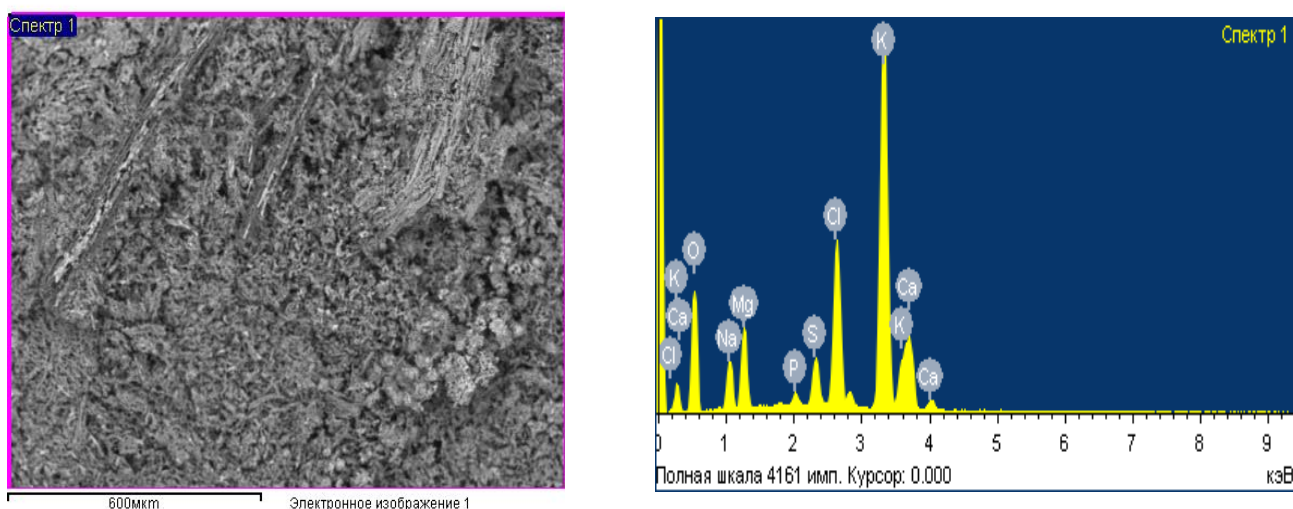
Поэтому определение физико-механических характеристик и химического строения стеблей хлопка-сырца для ее дальнейшей переработки и экспериментальные, теоретические исследования, уменьшение расходов на энергоносители, сохранение качества при переработке отходов хлопка-сырца в виде стеблей является актуальной задачей и имеет большое значение для развития сельского хозяйства Республики Казахстан.

С целью изучения возможностей использования отходов стеблей хлопчатника и разработки технологии переработки нами исследованы физико-химические характеристики стеблей хлопчатника (гуза-паи- *Gossypium herbaceum* L. Сорт хлопка Мактаарал-4011). Физико-химические характеристики стационарного слоя измельченных стеблей хлопчатника при дальнейшей ее переработке с целью получения строительных материалов определяет особенности переработки и интенсивность процессов.

В соответствии с предложенной классификацией Б.Н. Кауфмана, стебли хлопчатника отнесены к категории «органических материалов волокнистой структуры». К категории органически связанного материала волокнистого строения относятся материалы, имеющие заполнители из растительного сырья, а также связующее вещество, которое может быть минеральным и органическим. Следовательно, согласно классификации Б.Н. Кауфмана, исследуемые строительные материалы на основе гуза-паи можно отнести к материалам, органически связанным, имеющие грубоволокнистую структуру [133].

Из-за различного химического состава компонентов стеблей хлопка-сырца и влагопоглощающие свойства различны. Стебли хлопка-сырца относятся коллоидным капиллярно-пористым телам и в своем составе имеет вместе со свободной влагой и связанную влагу. Режим переработки стеблей хлопка-сырца зависит от качественных показателей. При переработке стеблей хлопка-сырца из-за неоптимальных режимов может наблюдаться обрыв, нарушение структуры, что может привести снижению качества волокон [134].

С целью определения химического состава использовали многоцелевой растровый электронный микроскоп (полезное увеличение 300 000) сочетает в себе возможности работы как в стандартном, так и в низковакуумном режимах. Дополнительно снабжен системой энергодисперсионного микроанализа INCA Energy 350 и приставкой для исследования текстуры и структуры поликристаллических образцов HKL Basic. Результаты исследования приведены на рисунке 2.1 [135].



а) структура стеблей, б) химический состав стеблей

Рисунок 2.1- Качественный и количественный рентгеновский энергодисперсионный микроанализ для идентификации различных фаз и включений

Из рисунка видно, что химический состав золы измельченных стеблей хлопчатника составляет O-39,21%, Na-4,9%, Mg-5,47%, P-0,7%, S-2,57%, Cl-10,42%, K-29,89%, Ca-6,84% [14, с.108].

2.2 Методики определения основных параметров и характеристик объекта исследования

Измельченные стебли хлопчатника являются пористым материалом. Пористость измельченных стеблей хлопка сырца $\varepsilon_{ш}$, ее насыпную плотность $\rho_{нас}$ мы определяли по методикам, приведенных в работе [136,137]. Истинная плотность стеблей хлопчатника приведены в справочной литературе [138].

Определение гранулометрического состава измельченных стеблей хлопчатника проводили согласно стандартной методике ситового анализа (ГОСТ 32989.1-2014), используя для отсева материала набор сит с размерами отверстий 10; 7; 5; 3; 2,0; 1,0; 0,5; 0,25 мм.

Усредненные размеры частиц Y_{yc} определяли согласно зависимости:

$$y_{yc} = \sum_{i=1}^N \frac{x_i \cdot y_i}{x_i}, \quad (2.1)$$

где: y_i – размер частиц фракции (ширина, толщина, диаметр, длина), м; x_i – количество частиц в выбранной пробе с размером y_i , %; N – количество частиц в отобранной пробе с размером y_i .

Определив усредненные размеры частиц каждой фракции теоретически рассчитывали усредненный объем и внешнюю поверхность частиц из зависимостей:

– для формы призматических частиц:

$$V = A \cdot B \cdot L, \quad (2.2)$$

$$F = 2 \cdot (A \cdot B + A \cdot L + B \cdot L), \quad (2.3)$$

– для частиц цилиндрической формы:

$$V = \frac{\pi d^2}{4} L \quad (2.4)$$

$$F = \pi \cdot d \cdot L + 2 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}, \quad (2.5)$$

где V -объем измельченных частиц стеблей хлопчатника, м^3 ; F -внешняя поверхность измельченных частиц стеблей хлопчатника, м^2 ; A -ширина измельченных частиц стеблей хлопчатника, м ; B -толщина измельченных частиц стеблей хлопчатника, м ; L -длина измельченных частиц стеблей хлопчатника, м .

Для определения эквивалентного диаметра между частицами стеблей хлопка, через которые при переработке проходят перерабатывающий агент, рассчитывали по формуле [139]:

$$d_e = \frac{4 \cdot \varepsilon_{\text{сл}}}{a}, \quad (2.6)$$

где $\varepsilon_{\text{сл}}$ – пористость стационарного слоя материала, $\text{м}^3/\text{м}^3$

Известно, что общую пористость стационарного слоя дисперсного материала $\varepsilon_{\text{сум}}$, образованного из частиц, характеризующиеся внутренней пористостью, можно представить как сумму пористости слоя материала $\varepsilon_{\text{сл}}$ и внутренней пористости частиц материала $\varepsilon_{\text{вн}}$

$$\varepsilon_{\text{сум}} = \varepsilon_{\text{сл}} + \varepsilon_{\text{вн}}. \quad (2.7)$$

Удельная поверхность стационарного слоя дисперсного материала определяется как отношение суммарной поверхности всех частиц к объему, который они занимают. То есть:

$$a_0 = \frac{F_{\text{сум}}}{V_{\text{сум}}}, \frac{\text{м}^2}{\text{м}^3}. \quad (2.8)$$

Удельную поверхность стационарного слоя измельченных стеблей хлопчатника определяли из зависимости:

$$a_0 = \frac{\sum_{i=1}^N F_{\text{фр}}}{V_{\text{сум}}} \quad (2.9)$$

где, $F_{\text{фр}}$ – суммарная поверхность всех частиц i -ой фракции м^2 ; $V_{\text{сум}}$ - суммарный объем слоя материала, м^3 ;

Чтобы определить эффективную поверхность, которую омывает тепловой агент, по описанной выше методике теоретически определяют поверхность

всех частиц каждой фракции и по методу Вилле–Грегори определяют коэффициент взаимного экранирования [140]. При этом активную удельную поверхность a_0 рассчитывали по формуле:

$$a = a_0 \cdot (1 - \varepsilon) \cdot k_e, \quad (2.10)$$

где k_e - коэффициент взаимного экранирования частиц.

Объем пор между частицами стеблей хлопка-сырца определяли по объему дистиллированной воды в мерном цилиндре. Пористость слоя стеблей хлопка-сырца рассчитывали по зависимости:

$$\varepsilon_{сл} = \frac{V_{H_2O}}{V_{сум}} \quad (2.11)$$

где $\varepsilon_{сл}$ пористость слоя измельченных стеблей хлопчатника, $м^3 / м^3$; $V_{сум}$ - общий объем измельченных стеблей хлопчатника загруженных в пикнометр (соответствует насыпной плотности), $м^3$; V_{H_2O} - объем дистиллированной воды, залитой из бюретки, $м^3$

Для исключения погрешности измерений внутренней пористости слоя измельченных стеблей хлопчатника, результаты общей пористости слоя измельченных стеблей хлопчатника сопоставляли с рассчитанными результатами на основе известных рекомендаций авторов приведенных в работе [139, с.412]:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{нас}}{\rho_{ус}} \quad (2.12)$$

где $\rho_{нас}$ - насыпная плотность пробы, $кг / м^3$; $\rho_{ус}$ - условная плотность измельченных стеблей хлопчатника, $кг / м^3$.

Насыпную плотность измельченных стеблей хлопчатника определяли по известной стандартной методике (ГОСТ 25699.14-93). Высушенный до постоянной массы измельченные стебли хлопка-сырца засыпали в цилиндрический сосуд до образования выпуклости над сосудом, выпуклость измельченных стеблей хлопка-сырца подравнивали с помощью шпателя. Используя аналитические весы марки AXSIS-3000 проводили взвешивание материала 15 раз. Наиболее отклоненные в большую или в меньшую сторону значение результатов отбрасывали и определяли насыпную плотность стеблей хлопка-сырца по формуле:

$$\rho_{нас} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \frac{m_i}{V_i} \quad (2.13)$$

где m_i - масса i -ой пробы материала, кг; V_i - объем i -ой пробы материала, $м^3$; N - количество проб.

Согласно методике, приведенной выше определяли гранулометрический состав измельченных стеблей хлопчатника, основные характеристики частиц

измельченных стеблей хлопчатника приведены в таблицах 2.1, 2.2 и 2.3 и на рисунке 2.2.

Таблица 2.1- Основные характеристики частиц измельченных стеблей хлопчатника

Фракция $d \cdot 10^3, м$	0,016- 0,025	0,025- 0,05	0,05- 0,1	0,1-0,2	0,2-0,3	0,3-0,5	0,5-0,7	0,7-1,0	1,0-2,0
G, кг	0,060	0,096	0,156	0,312	0,620	0,708	0,432	0,572	1,044
%, <i>мас</i>	1,5	2,4	3,9	7,8	15,5	17,7	10,8	14,3	26,1

Где в таблице 1 G- масса фракции, кг (остаток на сите); %, *мас* - проценты массовые.

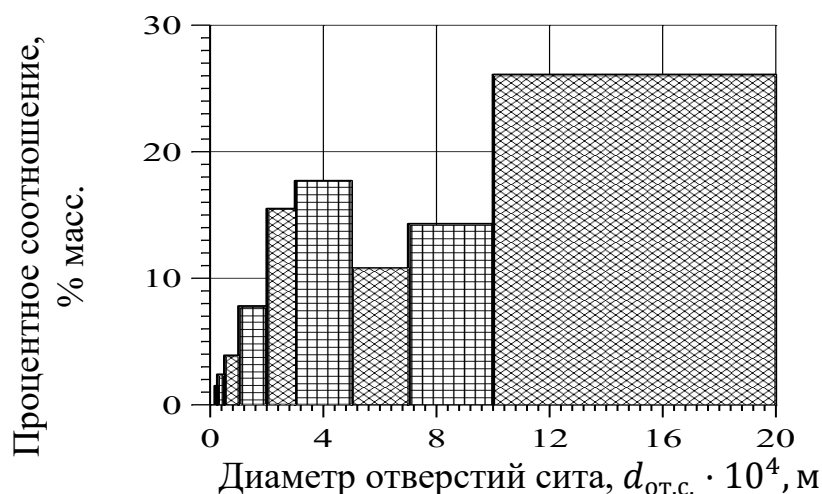


Рисунок 2.2- Результаты исследований гранулометрического состава измельченных стеблей хлопчатника

Таблица 2.2- Основные характеристики частиц измельченных стеблей хлопка (гуза пай) призматической формы

Фракция, $d \cdot 10^3, м$	$A \cdot 10^3, м$	$B \cdot 10^3, м$	$L \cdot 10^3, м$	Содержание фракции, %	Объем одной частицы $V \cdot 10^7, м^3$	Объем всех частиц $V \cdot V \cdot 10^3, м^3$	Поверхность одной частицы $F \cdot 10^4, м^2$	Поверхность всех частиц $F, м^2$	Масса одной частицы $G_1 \cdot 10^4, кг$	Масса Фракции $G_f, кг$	Количество частиц во фракции, N, шт	Удельная поверхность всех частиц $a_0, \frac{м^2}{м^3}$
«Призматические» частицы												
10^{-7}	6	8	40	47	19,20	0,922	12,2	0,5837	6,11	0,36472	480	633
	7	7,14	30	39	14,99	0,765	9,48	0,4837	4,77	0,30264	510	633
	9,17	4	20	14	7,34	0,274	6,0	0,2245	2,33	0,10864	374	818
Всего				100	-	1,96	-	1,2918	-	0,776		2084
7^{-5}	5,74	4	40	49	9,18	0,723	8,25	0,6494	3,64	0,28616	787	898
	6,32	3	30	32	5,69	0,472	5,97	0,4956	2,25	0,18688	830	1050
	6,71	2	20	19	2,68	0,280	3,75	0,3917	1,06	0,11096	1044	1398
Всего				100	-	1,475	-	1,5367	-	0,584	-	3346
5^{-3}	4	3	30	71	3,600	1,951	4,44	2,4060	1,43	0,7725	5419	1233
	4,58	2	20	29	1,832	0,797	2,82	1,22433	0,73	0,3155	4349	1537
Всего				100	-	0,00275	-	3,6304	-	1,088	-	2770

Таблица 2.3 - Основные характеристики частиц измельченных стеблей хлопка (гуза паи) цилиндрической формы

Усредненный диаметр частиц, $d_{\text{ус}} \cdot 10^3, \text{ м}$	Длина частицы $L \cdot 10^3, \text{ м}$	Объем одной частицы $V_1 \cdot 10^8, \text{ м}$	Поверхность одной частицы $F \cdot 10^5, \text{ м}^2$	Масса одной частицы $G \cdot 10^6, \text{ кг}$	Содержание фракции, %	Масса фракции $G_{\text{фр}}, \text{ кг}$	Количество частиц во фракции, N, шт	Поверхность всех частиц $F, \text{ м}^2$	Удельная поверхность всех частиц $a_0, \text{ м}^2/\text{м}^3$
«цилиндрические» частицы									
3	18	11,08	121,60	43,87	65	0,4706	10728	1,82982	1539,68
	15	7,36	94,84	29,14	31	0,2244 4	7701	0,98236	1733,33
	12	4,56	60,01	18,06	4	0,0289 6	1604	0,14515	1984,85
Всего:					100	0,724	-	2,95733	5257,86
2	15	3,82	8,99	15,11	68	0,2529 6	16744	1,50473	2355,56
	12	2,41	6,43	9,55	26	0,0967 2	10128	0,65130	2666,67
	10	1,54	4,70	6,09	6	0,0223 2	3663	0,17230	3057,14
Всего:					100	0,372	-	2,32833	8079,37
1	40	2,01	10,15	7,96	69	0,1849 2	23267	2,36125	5050,00
	30	1,15	6,67	4,57	21	0,0562 8	12316	0,82159	5780,95
	20	0,39	3,18	1,55	10	0,0268	17243	0,54820	8100,00
Всего:					100	0,268	-	3,73104	18930,95
0,5	40	0,50	5,05	1,99	71	0,1334 8	67092	3,387556	10050,00
	30	0,38	3,79	1,49	22	0,0413 6	27719	1,051415	10066,67
	20	0,19	2,22	0,76	7	0,0131 6	17279	0,383116	11528,57
Всего:					100	0,188	-	4,822086	31645,24

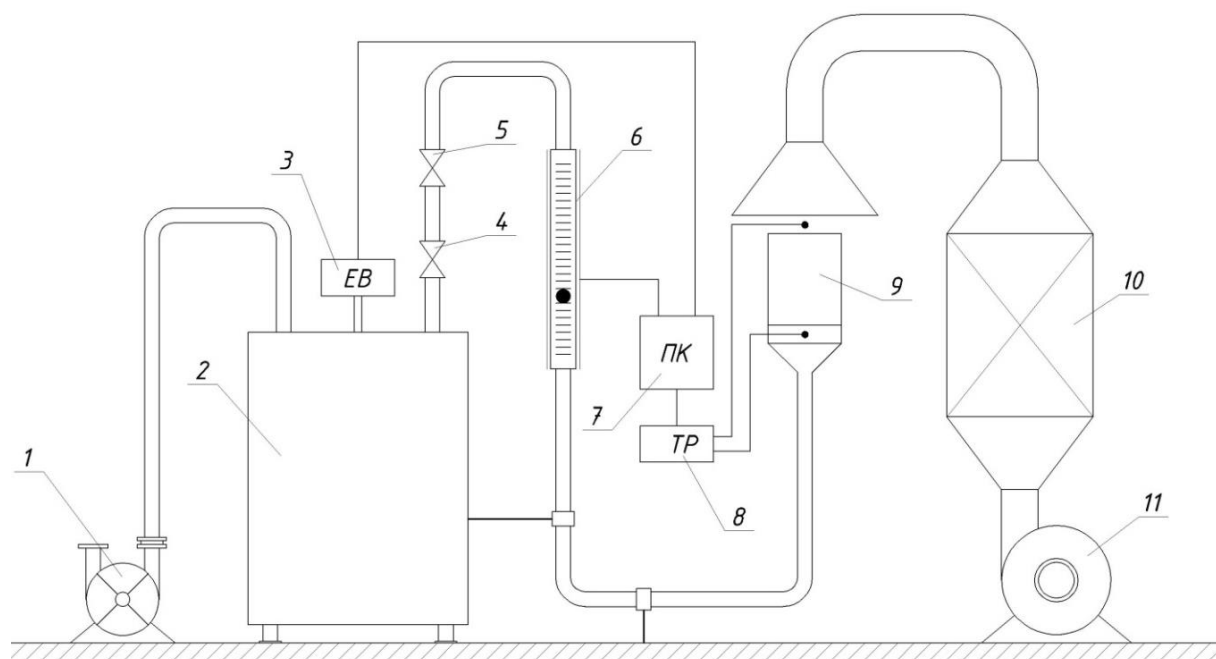
Пористая структура стеблей хлопка –сырца имеют адсорбционную способность, диффузионную проницаемость и теплопроводность. При дальнейшей переработке измельченных стеблей хлопка –сырца с целью получения строительных материалов ее физико-механические характеристики и физико-химическая структура определяет особенности при переработке.

При переработке затраты энергии уходят на нагрев до необходимой температуры переработки и потери давления в слое материала. Учитывая перечисленное, необходимо определить потери давления во влажном слое измельченных стеблей хлопка-сырца, который зависит от фиктивной скорости перерабатывающего агента, это один из важных факторов, влияющих на интенсивность переработки и экономическую целесообразность.

2.3 Описание экспериментальной установки для исследования гидродинамических, кинетических и тепло - и массообменных параметров процесса фильтрационной сушки измельченных стеблей хлопка

На рисунке 2.3 представлена схема экспериментальной установки для проведения исследований гидродинамических, кинетических и тепломассообменных параметров, которая позволяет реализовать процесс фильтрационной сушки измельченных стеблей хлопка [15, с.48; 141].

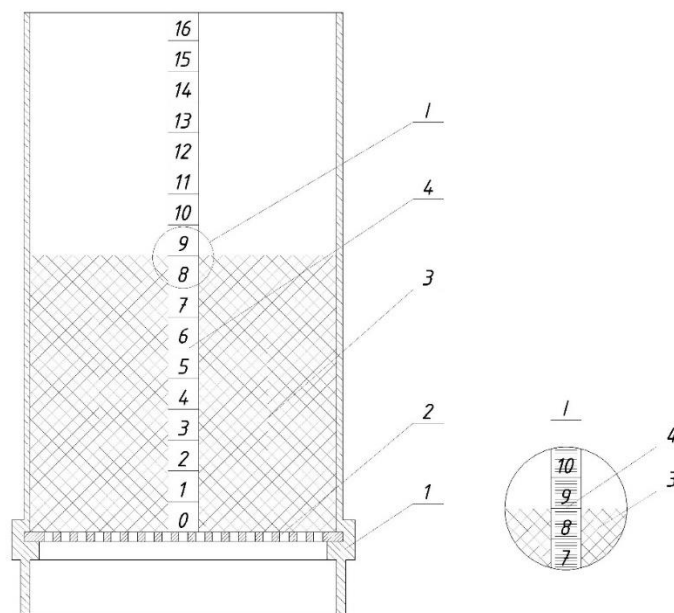
Экспериментальная установка состоит из циркуляционного вакуумного насоса 1, который создает разрежение в ресивере 2. На ресивере установлен электронный вакуумметр 3. Ресивер соединен через систему трубопроводов с запорным 4 и регулирующим 5 вентилями с электронным ротаметром 6, показание которого выводится на персональный компьютер 7, и с контейнером 9. Тепловой агент, предварительно подогретый до заданной температуры в калорифере 10 подается в зону сушки с помощью вентилятора 11. Для измерения (поддержание) температуры теплового агента на выходе из диффузора и на выходе из контейнера установлены термопары, которые подключены к электронному терморегулятору 8 [15, с.49; 141, с.318].



1 - циркуляционный вакуумный насос; 2 - ресивер; 3 - электронный вакуумметр ДВ250А; 4, 5 - запорный и регулирующий вентили; 6 - электронный ротаметр; 7 - персональный компьютер 8 электронный терморегулятор SESTOS D1S; 9 - контейнер; 10 - калорифер; 11 - вентилятор.

Рисунок 2.3- Схема экспериментальной установки

Схема контейнера представлена на рисунке 2.4. Основа контейнера 1 выполнена из дюралюминия. Перфорированная перегородка 2 и боковая стенка выполнена из теплоизоляционного материала (фторопласта), чтобы предотвратить кондуктивный нагрев частиц волокон хлопка-сырца во время сушки [141, с.319].



1 - корпус контейнера, 2 - перфорированная перегородка, 3 - слой измельченных стеблей хлопка, 4 - шкала измерения изменения высоты слоя материала.

Рисунок 2.4- Схема контейнера для загрузки измельченных стеблей хлопка

Для исследования гидродинамики движения теплового агента сквозь слой измельченных стеблей хлопка, высушенный до постоянной массы слой материала загружали в контейнер 1. С помощью штангенциркуля измеряли высоту слоя и уточняли ее путем взвешивания и расчета насыпной плотности слоя, чтобы обеспечить однозначность условий всех экспериментов. Контейнер 9 соединен с ресивером 2. Включали вакуум-насос 1 и с помощью регулирующего вентиля 5, устанавливали различные расходы воздуха через слой волокна хлопка-сырца. Расход теплового агента определяли по показаниям ротаметра 6, а потери давления по показаниям U - образного манометра [15, с.50; 141, с.319; 142]. При увеличении перепада давления, вследствие увеличения скорости движения теплового агента сквозь слой материала, наблюдается уменьшение высоты. По шкале мерной линейки 4 фиксировали изменение высоты слоя измельченных стеблей хлопка.

Для исследования кинетики фильтрационной сушки слоя измельченных стеблей хлопка по сухому материалу устанавливали необходимую скорость фильтрации теплового агента. Включали вентилятор 11 и калорифер 10, а после достижения заданной температуры, которая измеряется и регулируется с помощью прибора РТ-100 с точностью $\pm 0,50$ С, включали вакуум-насос 6 и контейнер с влажным материалом подключали ресивер 2 открытием запорных 4 и регулирующих 5 вентилях. Через заданные промежутки времени фиксировали изменение веса контейнера с влажным материалом, эксперимент продолжали до достижения постоянной массы в течение 60 – 120 сек. Время взвешивания контейнера составлял не более 15-20 сек. Для исключения испарения влаги из материала контейнер закрывали крышкой [143, 144].

Для исследования внешнего теплообмена между частицами сухого материала и тепловым агентом высушенные до постоянного веса измельченные стебли хлопка загружали в контейнер, который изготовлен из теплоизоляционного материала (фторопласта). Чтобы температура верхних и нижних слоев была примерно одинаковой, исследования проводили в “моно слое”. Для этого высоту слоя материала брали 3 - 4 мм с целью обеспечения равномерной фильтрации теплового агента через всю плоскость контейнера. На высоте 20 мм над слоем материала и 20 мм под перфорированной перегородкой для измерения температуры теплового агента устанавливали термопары ХК, которые подсоединяли к электронному терморегулятору SESTOS D1S с выводом информации на персональный компьютер. Температура теплового агента измерялась на выходе из слоя волокнистых материалов в шести точках: в центре контейнера и на расстоянии 5, 10, 20, 30, 40 мм от его стенки и определялась как среднее арифметическое из шести значений. Над слоем материала температура поддерживалась постоянной 40, 60, 80 и 100 °С с точностью $\pm 0,5$ °С с помощью терморегулятора SESTOS D1S и ХК термопары, которая была размещена над слоем материала. Измерение температуры осуществлялось автоматически через 1,3 с, а результаты выводились на персональный компьютер и записывались в файл данных [145].

Экспериментальные исследования внутридиффузионного процесса переноса влаги в частицах из стеблей хлопка проводили на экспериментальной установке, изображенной на рисунке 2.3. Для исследования внутридиффузионных процессов в частицах, образованных в результате измельчения свежесрезанного стебля хлопка формировали слой высотой $H = 20 \cdot d_{чс}$.

Контейнер со слоем материала помещали в установку фильтрационной сушки и через стационарный слой влажного материала профильтровывали тепловой агент с постоянным расходом, нагретый до температуры 293, 316, 333, 353, 373К. Температура теплового агента контролировалась с помощью электронного терморегулятора SESTOS DIS. Изменение массы материала фиксировали весовым методом. Исследование проводили до установления постоянной массы материала [145, с.164].

2.4 Методика оценки погрешностей измерений

Точность расчетов определяется погрешностью измерений геометрических и технологических параметров. Оценка погрешности измерений (таблица 2.4) осуществлялась на основе рекомендаций, приведенных в [146-148].

Для измерения геометрических размеров отдельных частиц использовали штангенциркуль 0-125мм. Вес влажного и сухого дисперсного материала измерялась с помощью: до 200 г аналитические весы с точностью 0,0001 г, до 500 г торсионные весы с точностью 0,01 г, до 2000 г электронные весы с точностью 1 г. Время измеряли с помощью электронного секундомера фирмы Casio модели HS-6, с точностью измерения 0,01 сек.

Температуру измеряли с помощью термопар ХК и измерительных устройств ЦР-7260, РТ-0102, ПВИ-0298. Постоянство температуры фильтрационной сушки поддерживалась с помощью устройства ЦР-7260 с точностью $\pm 0,4^{\circ}\text{C}$.

Для градуировки ХК термопар применялась стандартная методика.

Измерение расхода теплового агента осуществляли с помощью ротаметра РС-7, перепад давления – с помощью: до 4000 Па – U-образного манометра и более 4000 Па – вакуумметра.

Среднеквадратичное отклонение расчетных значений от экспериментально полученных рассчитывали по формуле [147, с.15]:

Таблица 2.4 -Границы погрешности прямых измерений

Величина	Обозначение	Един. изм.	Прибор	Погрешность	
				абсолютная	относительная
Диаметр	d	м	Штангенциркуль	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$
Вес	G	кг	Аналитическая	$1 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-10}$
			Торсионная	$1 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-8}$
			Электронная	$1 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-7}$
Объем	V	м^3	Мерный цилиндр	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-9}$
			Счетчик РГ-40	–	1,81%
Температура	t	$^{\circ}\text{C}$	ЦР-7200	$1 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-3}$
			РТ-0102	1	$1 \cdot 10^{-2}$
			ПВИ-0298	1	$1 \cdot 10^{-2}$
Относительная влажность	φ	%	РТ-0102	1	$1 \cdot 10^{-2}$
Объемный расход	V_c	$\frac{\text{м}^3}{\text{с}}$	Ротаметр РС-7	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-5}$
Перепад давлений	ΔP	$\frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$	Вакуумметр	$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-5}$
		мм.вод.ст.	U- подобный манометр	1	$4 \cdot 10^{-3}$
Время	τ	с	Электронный секундомер Casio HS-6	$1 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-6}$

$$S = \sqrt{\frac{\sum (X - \bar{X})^2}{n - 1}} \quad (2.14)$$

где X-рассчитанное значение;

\bar{X} - усредненное экспериментальное значение;

n - количество измерений.

Относительную погрешность между рассчитанными и экспериментальными значениями определяли по формуле [147, с.25]:

$$\Delta = \left| \frac{X_e - X_m}{X_e} \right| \quad (2.15)$$

3 ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ СТАЦИОНАРНОГО СЛОЯ ИЗМЕЛЬЧЕННЫХ СТЕБЛЕЙ ХЛОПКА (ГУЗА ПАЯ) ПРИ ФИЛЬТРАЦИИ ТЕПЛООВОГО АГЕНТА

Объектом данного исследования является гидравлическое сопротивление неподвижного слоя измельченных стеблей хлопчатника. Одной из наиболее проблемных областей является влияние физико-механических характеристик неподвижного слоя измельченных стеблей хлопчатника на гидродинамику фильтрационной сушки.

Как отмечалось в литературном обзоре, некоторое количество стеблей хлопка используются местными жителями в качестве дешевого топлива, но значительная часть стеблей хлопка используется неэффективно. Часто стебли хлопка сжигают непосредственно на полях, нанося вред окружающей среде или вспашке, что угрожает передачей болезней на новые хлопковые плантации. Поэтому проблема их рационального использования требует технического решения [6, с. 28]. При соответствующих технических решениях эти отходы могли бы стать вторичным сырьем для производства легкого строительного бетона [127, с.30]; для производства недорогого теплоизоляционного конструкционного и строительного материала [128, с. 11]; для получения легких композитных древесно-пластиковых плит [6, с.29]; адсорбентов [26, с.1208]; получение биологически активных соединений и полисахаридов [130, с. 27]; производство твердого экологически чистого биотоплива [131, с.260; 132, с.25].

Чтобы использовать стебли хлопка в качестве вторичного сырья, его необходимо измельчить и высушить до конечного влагосодержания 0,1–0,12 кг H_2O /кг сухого вещества.

Одним из высокоэффективных методов сушки влажных материалов является фильтрационная сушка, суть которой заключается в фильтрации теплового агента через неподвижный слой дисперсного материала за счет перепада давления. Затраты энергии в этом случае складываются из потерь давления в неподвижном слое дисперсного материала и энергии на нагрев теплового агента [149].

Движение газового потока через пористый неподвижный слой материала во многом определяет кинетику фильтрационной сушки материала [66, с.130]. Существует тесная взаимосвязь между скоростью сушки влажного материала во время фильтрационной сушки и гидродинамикой процесса. На этот процесс существенное влияние оказывает характер поля скоростей газового потока, который омывает отдельные частицы дисперсного материала, определяет режим движения и, соответственно, коэффициенты теплоотдачи и массообмена. Кроме того, расход газа влияет на толщину пограничного слоя вокруг частицы, что определяет интенсивность процесса, как теплопередачи, так и массопереноса влаги.

Влияние гидродинамики потоков газа и дисперсных материалов в непрерывно работающих сушилках шахтного типа, в которых авторы учитывают неоднородность поля скоростей газового потока на скорость сушки

полимерных материалов, приведено в [92, с.55]. Исследованию гидродинамики неподвижного слоя различных дисперсных материалов посвящена работа [140, с.102]. В нем анализируется большое количество результатов экспериментальных исследований многих ученых. Коэффициент гидравлического сопротивления неподвижного слоя дисперсного материала определяли при фильтрации газового потока в направлении "перфорированная перегородка – дисперсный материал" в пределах скорости газа, не превышающей скорости псевдооживления слоя. Результаты, полученные различными авторами, приведены в безразмерном виде. В то же время данная работа показывает большое расхождение между расчетными зависимостями, предложенными авторами, а также границами их применения применительно к режимам течения газа. Расчетные зависимости, полученные в этих работах, не могут быть использованы для прогнозирования потерь давления при фильтрационной сушке измельченных стеблей хлопчатника по двум причинам.

Таким образом, объектом исследования является гидродинамика неподвижного слоя измельченных стеблей хлопчатника. Предметом исследования является влияние физико-механических характеристик неподвижного слоя измельченных стеблей хлопчатника на гидродинамику фильтрационной сушки. Целью данного исследования является экспериментальное изучение влияния физико-механических характеристик неподвижного слоя измельченных стеблей хлопчатника на потери давления при фильтрационной сушке.

Экспериментальные исследования движения газового потока в направлении "неподвижный слой дисперсного материала – перфорированная перегородка" проводились по методике, одобренной многими авторами, которая подробно описана в [66, с.130]. Для определения потерь давления в неподвижном слое дисперсного материала используется зависимость (1.8) Дарси-Вайсбаха [72, с 515].

Принимая во внимание, что коэффициент гидравлического сопротивления λ_l является функцией числа Рейнольдса, уравнение (1.9) может быть представлено в виде двухчленного уравнения (1.10), которое учитывает потери на трение и потери на локальное сопротивление. Для определения неизвестных опытных коэффициентов A и B уравнения (1.10) следует привести к линейному виду относительно фиктивной скорости фильтрации газового потока и представить в виде:

$$\frac{\Delta P}{H \cdot v_0} = A^* + B^* \cdot v_0 \quad , \quad (3.1)$$

где $A^* = A \cdot \frac{\mu \cdot a^2}{32 \cdot \varepsilon^3}$ и $B^* = B \cdot \frac{\rho \cdot a}{8 \cdot \varepsilon^3} \cdot v_0$

Первая составляющая этого уравнения является постоянной (для конкретных условий эксперимента), во второй составляющей переменной является только фиктивная скорость.

Опытные коэффициенты уравнения (3.1) для стеблей хлопка были определены экспериментально в условиях эксперимента и могут быть использованы для практических расчетов сушильного оборудования.

Предсказать потерю давления при фильтрационной сушке можно только в заданном ходе эксперимента диапазоне скоростей газового потока [141, с. 320].

Однако на практике довольно удобно использовать расчетные зависимости (1.2) и (1.3), представленные в безразмерном виде, с учетом режима газового потока и влияния геометрических параметров сушильной установки на потери давления в неподвижном слое дисперсного материала. В этом случае потери давления можно представить в виде функциональной зависимости критерия Эйлера от критерия Рейнольдса и геометрического симплекса [142, с. 140].

Неизвестные значения константы A и показателей x и y определяются экспериментально. Такая форма представления обобщения экспериментальных данных позволяет, используя теорию подобия, прогнозировать потери давления в фильтрационно-сушильных установках при аналогичных режимах газового потока [15, с.50].

Объектом экспериментальных исследований служили измельченные стебли хлопчатника. Стебли хлопка измельчали на дробилке ДКУ-М (Украина). Измельченные стебли хлопка массой 6 кг просеивали через сито с круглыми отверстиями диаметром 10 мм. Частицы, прошедшие через отверстия сита диаметром 10 мм и массой 4 кг, были разделены на 7 фракций. Остаток материала, который оставался на каждой последующей подаче, взвешивали с помощью аналитических весов AXIS-AD3000 (Польша) с точностью измерения до 0,01 г, и содержание рассчитывали по весу.

Экспериментальные исследования гидродинамики фильтрации газового потока через неподвижный слой измельченных стеблей хлопчатника проводились по методу, описанному в [141, с.319; 66, с. 96]. Результаты экспериментальных исследований потерь давления в зависимости от фиктивной скорости для высот слоев материала 60, 80, 100, 120, 140, и 160 мм показаны на рисунках 3.1 и 3.2.

Анализ рисунков 3.1 и 3.2 показал, что увеличение высоты неподвижного слоя измельченных стеблей хлопчатника с 60 до 160 мм приводит к увеличению потерь давления при скорости $v_0=1,5$ м/с с 3000 до 7400 Па и при скорости 2,5 м/с не превысит 15000 Па. Поэтому, учитывая незначительные потери давления в неподвижном слое измельченного хлопка, метод фильтрационной сушки может быть рекомендован для использования в качестве одного из высокоэффективных и энергосберегающих методов. В то же время показанные кривые являются параболическими. Это означает, что гидравлическое сопротивление исследуемого материала обусловлено как инерционной, так и вязкостными составляющими.

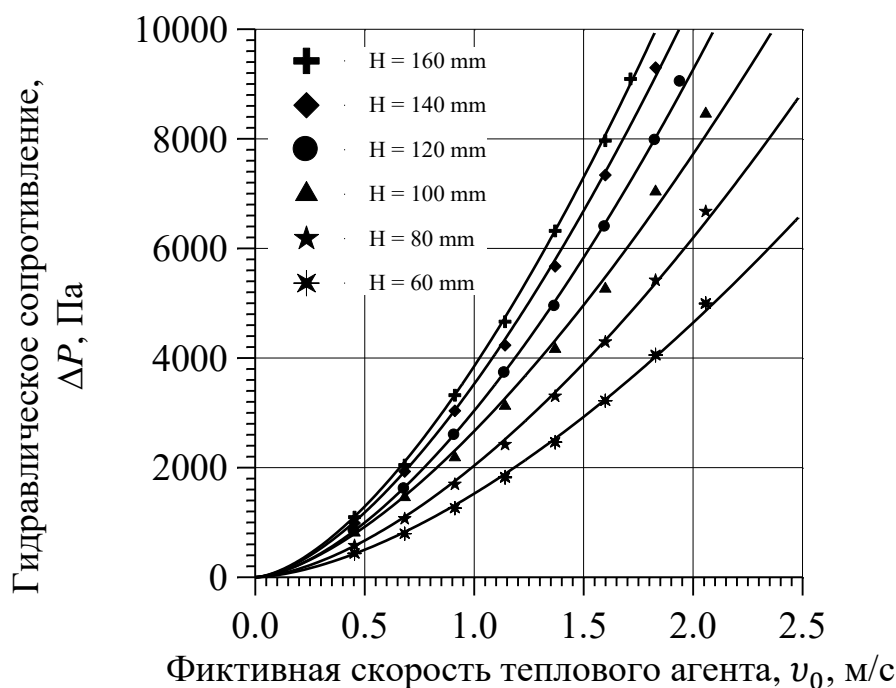


Рисунок 3.1 - Зависимость потери давления ΔP в неподвижном слое различной высоты H измельченных стеблей хлопчатника в зависимости от фиктивной скорости фильтрации теплового агента

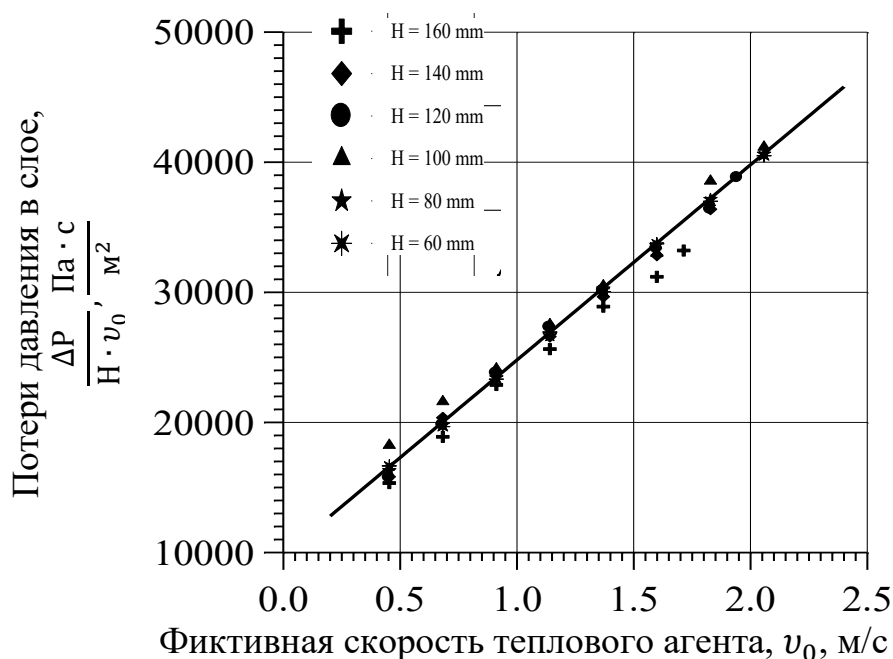


Рисунок 3.2 - Зависимость $\frac{\Delta P}{H \cdot v_0} = f(v_0)$ для измельченных стеблей хлопка

Для обобщения результатов экспериментальных исследований, приведенных на рисунках 3.1 и 3.2, используем зависимость Дарси Вейсбаха представленную в виде двухчленного уравнения (3.1). Для этого представим результаты экспериментальных исследований, приведенных на рисунках 3.1 и

3.2 в виде функциональной зависимости, тогда уравнение (3.1) можно представить в виде:

$$\frac{\Delta P}{H \cdot v_0} = 9800 + 15000 \cdot v_0 \quad (3.2)$$

Полученная зависимость может быть использована для прогнозирования потерь давления в неподвижном слое измельченных стеблей хлопка при практических расчетах сушильного оборудования в пределах изученных скоростей фильтрации газового потока.

На рисунке 3.4 показано сравнение экспериментальных значений с рассчитанными на основе зависимости (3.2).

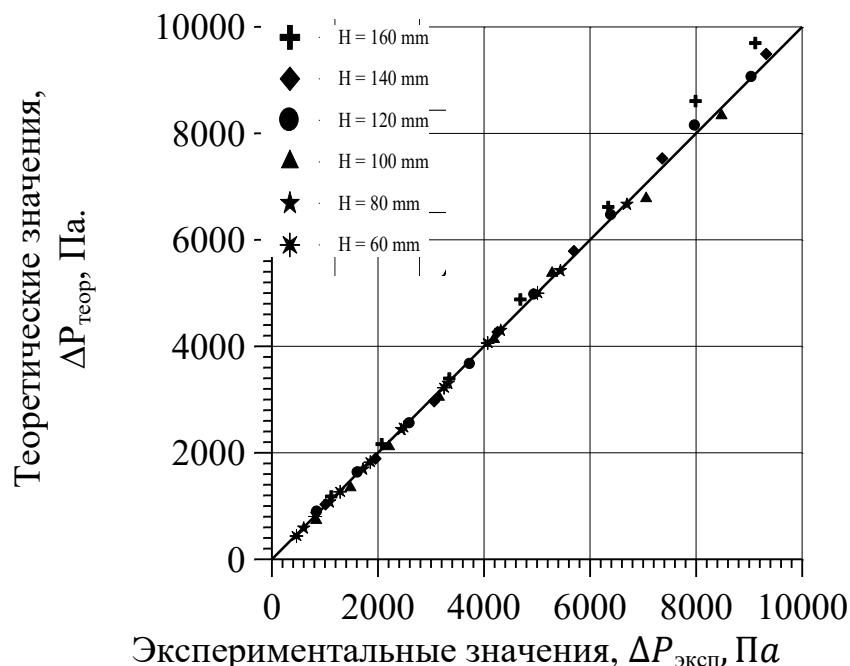


Рисунок 3.3 - Корреляционная зависимость между экспериментальными значениями, показанными на рисунке 3.1, и рассчитанными на основе зависимости (3.2)

Абсолютное значение относительной погрешности между экспериментальными данными и расчетными значениями было рассчитано на основе уравнения:

$$\delta = \left| \frac{\Delta P_{\text{эксп}} - \Delta P_{\text{теор}}}{\Delta P_{\text{эксп}}} \right| \cdot 100\% \quad (3.3)$$

Из рисунка 3.3 видно, что абсолютное значение относительной погрешности между экспериментальными данными и данными, рассчитанными на основе зависимости (3.2), не превышает 9,6 %. Это приемлемо для практического использования при проектировании нового сушильного оборудования.

Для получения расчетных зависимостей в виде безразмерных комплексов результаты экспериментов, показанные на рисунках 3.1 и 3.2, были представлены в виде зависимости числа Эйлера от числа Рейнольдса (рисунок 3.5).

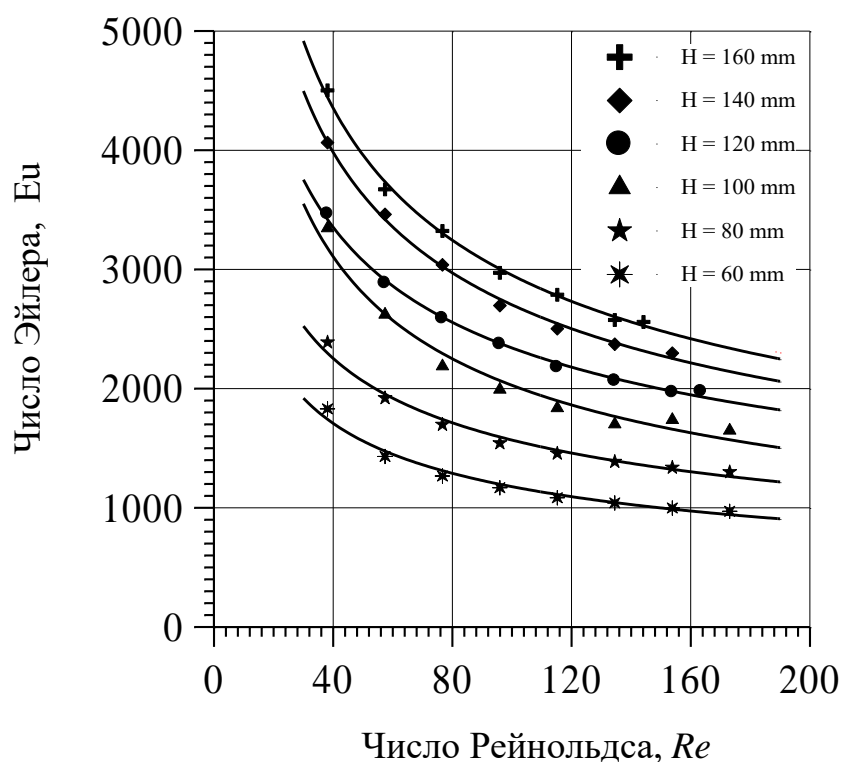


Рисунок 3.4- Зависимость числа Эйлера от числа Рейнольдса для разной высоты неподвижного слоя измельченных стеблей хлопка

Анализ рисунка 3.4 показывает, что число Эйлера зависит от высоты неподвижного слоя материала, и экспериментальные точки довольно хорошо аппроксимируются степенным законом. Кривые для всех высот практически параллельны друг другу, а расстояние между кривыми пропорционально высоте неподвижного слоя.

Аппроксимация экспериментальных данных, показанных на рисунке 3.5, степенной функцией позволила определить показатель числа Рейнольдса, который для всех высот равен 0,4, а неизвестный опытный коэффициент А для каждой высоты имеет разное значение. Результаты исследования приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Зависимость неизвестных опытных коэффициентов и показателей от высоты неподвижного слоя измельченных стеблей хлопчатника

$H, \text{ м}$	0,16	0,14	0,12	0,10	0,08	0,06
$H_e = 1,5 \cdot H, \text{ м}$	0,24	0,21	0,18	0,15	0,12	0,09
H_e/d_e	187,06	163,68	140,29	116,91	93,53	70,15
A^*	18800	17200	14700	13000	9800	7400
x	0,4					

Для получения обобщающей зависимости для всех исследованных высот на рисунке 3.5 показана зависимость, $A=f(H_e/d_e)$, как можно видеть, неизвестные опытные коэффициенты A^* , определенные для каждой высоты слоя, попадают на прямую линию, аппроксимация этих значений степенной функцией позволит определить неизвестный коэффициент А и показатель

геометрического симплекса (H_e/d_e), который равен единице. Результаты исследования представлены в таблице 3.2.

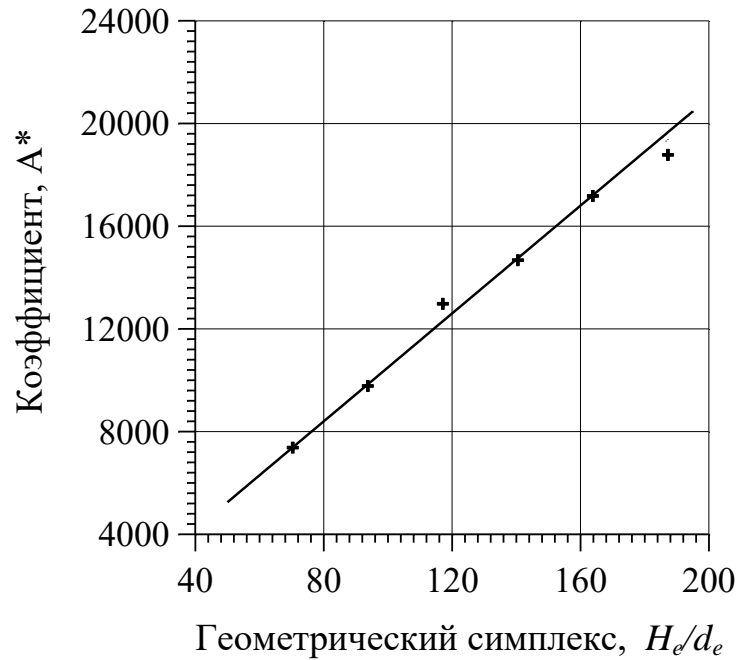


Рисунок 3.5 - Зависимость коэффициента A^* от геометрического симплекса (H_e/d_e)

На основании обобщения экспериментальных данных, приведенных на рисунке 3.1, расчетную зависимость (1.3) можно представить в виде:

$$Eu = 105 \cdot Re_e^{-0,4} \cdot \frac{H_e}{d_e} \quad (3.4)$$

Эта зависимость справедлива при значении числа Рейнольдса $40 \ll Re \ll 180$.

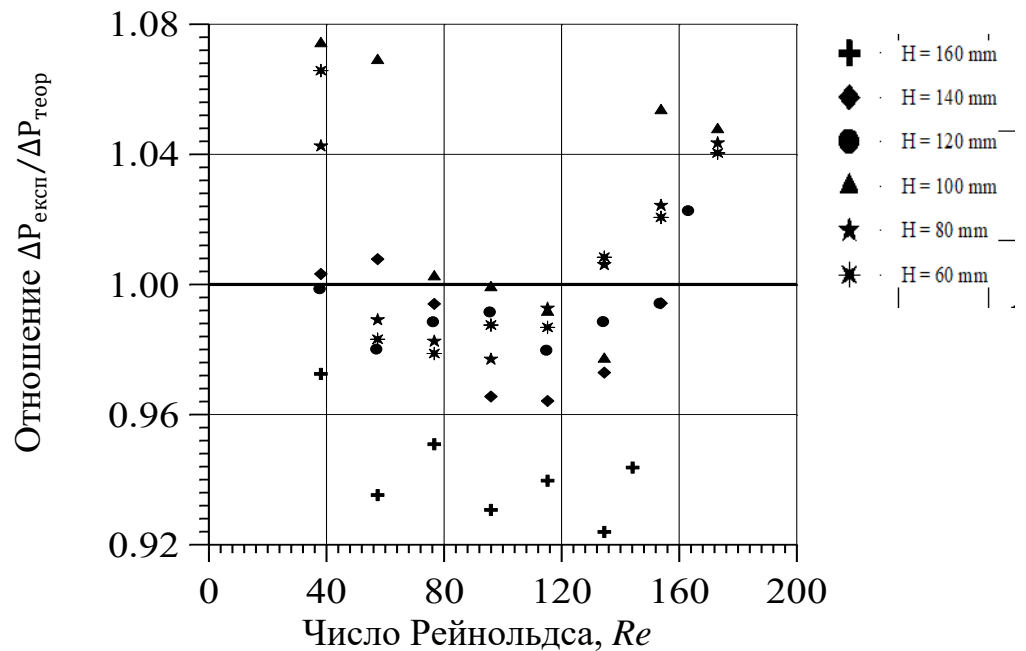


Рисунок 3.6 – Зависимость отношения $\Delta P_{\text{эксп}}/\Delta P_{\text{теор}}$ от числа Рейнольдса

На рисунке 3.6 показана корреляционная зависимость между отношением $\Delta P_{\text{эксп}}/\Delta P_{\text{теор}}$ к числу Рейнольдса в неподвижном слое измельченных стеблей хлопка. Теоретические значения потерь давления рассчитываются на основе зависимости (3.4).

По анализу рисунка 3.6 видно, что абсолютное значение максимальной погрешности между экспериментальными данными о потерях давления в неподвижном слое измельченных стеблей хлопчатника и данными, рассчитанными на основе зависимости (3.4), не превышает 8 %. Это вполне приемлемо для использования зависимости (3.4) для проектных расчетов потерь давления при проектировании нового сушильного оборудования.

4 КИНЕТИКА И ПРОЦЕССЫ ТЕПЛОМАССОБМЕНА ПРИ ФИЛЬТРАЦИОННОЙ СУШКЕ ИЗМЕЛЬЧЕННЫХ СТЕБЛЕЙ ХЛОПКА (ГУЗА ПАЯ)

Сушка измельченных растительных материалов, в частности измельченных стеблей хлопчатника, является сложной тепломассообменной и технологической задачей, успешное решение которой в конечном итоге определяет удельные энергетические затраты и качество готовой продукции. Рациональный режим сушки измельченных стеблей хлопчатника должен обеспечить минимально возможные значения длительности процесса, энергетические затраты и обеспечить необходимые качественные характеристики высушенного материала. Для решения этой задачи необходимо исследовать влияние технологических параметров процесса (температуры и скорости фильтрования теплового агента), а также толщины стационарного слоя измельченных стеблей хлопчатника на кинетику сушки [143, с.308; 144, с.55].

Исследования по использованию стеблей хлопчатника как материала крайне важны с точки зрения уменьшения антропогенного воздействия на окружающую среду. Рациональное использование стеблей хлопчатника позволит сэкономить значительное количество ископаемых источников энергии, и соответственно, уменьшить количество выбросов углекислого газа в атмосферу. Для переработки стеблей хлопка их необходимо измельчить, высушить до конечного влагосодержания 0,1–0,12 кг H₂O/кг сухих материалов.

Целью этой главы является установление основных кинетических закономерностей фильтрационной сушки измельченных стеблей хлопчатника. Это позволит уменьшить энергетические затраты и негативное влияние на окружающую среду.

Для достижения указанной цели определены следующие задачи исследования:

- теоретически проанализировать кинетику высушивания влажных материалов;
- экспериментально исследовать кинетику фильтрационной сушки измельченных стеблей хлопчатника при разных температурах и скоростях фильтрации теплового агента, а также при разных высотах стационарного слоя;
- получить расчетные зависимости для расчета изменения влагосодержания во времени и времени фильтрационной сушки измельченных стеблей хлопчатника в периодах полного и частичного насыщения теплового агента влагой;
- сравнить экспериментальные данные с теоретическими расчетами и установить значение относительной погрешности.

4.1 Теоретический анализ кинетики фильтрационной сушки

Для фильтрационного процесса сушки измельченных стеблей хлопчатника, исходя из физических особенностей его протекания, может быть

использована модель идеального вытеснения, поскольку критерий Пекле ($Pe \gg 1$), которая приведена в работе [150].

Для математического описания кинетики фильтрационной сушки материалов в периоде полного насыщения теплового агента влагой используем систему дифференциальных уравнений материального баланса влаги и кинетики их сушки [150, с. 118], которая справедлива по $0 < \varphi < 1$:

$$\begin{cases} \frac{\partial \varphi}{\partial H} = a \cdot (1 - \varphi); \\ -\frac{\partial w^c}{\partial \tau} = n \cdot (1 - \varphi); \end{cases} \quad (4.1)$$

где φ - относительная влажность воздуха, в долях;

H - толщина измельченного материала, м;

w^c - текущее влагосодержание материала, кг H_2O /кг сух.мат.;

a - кинетический коэффициент, $1/м$, который не зависит от параметров процесса, а зависит только от структуры материала и рассчитывается по формуле:

$$a = \frac{B \cdot \bar{m} \cdot \bar{n}}{0,622 \cdot P_s}, \quad (4.2)$$

где: $\bar{m} = \frac{\rho \cdot F}{100 \cdot M}$; $\bar{n} = \bar{S} \cdot \bar{\beta} \cdot P_s$.

B - барометрическое давление, Па;

P_s - давление насыщенного пара, Па;

ρ - плотность теплового агента, $кг/м^3$

F - площадь поперечного сечения контейнера, $м^2$;

M - массовая скорость теплового агента, $кг/с$

\bar{S} - внутренняя поверхность всех частиц измельченных стеблей хлопчатника, которые омывает тепловой агент, $м^2$;

β - коэффициент массоотдачи, $\frac{кг H_2O}{кг с. м. \cdot с \cdot м^2 \cdot Па}$

Тогда зависимость (4.2) с учетом выражений для вычисления m и n можно записать в виде [143, с.309; 144, с.56]:

$$a = \frac{F \cdot B \cdot \rho \cdot \bar{S} \cdot \beta}{62,2 \cdot M}. \quad (4.3)$$

Решение системы уравнений (4.1) позволяет получить зависимость, которая описывает кинетику фильтрационной сушки измельченных стеблей хлопчатника в периоде полного насыщения теплового агента влагой до достижения критического влагосодержания $w_{кр}$ измельченными стеблями хлопчатника:

$$\frac{w^c}{w_0^c} = 1 - \eta \cdot \tau \cdot e^{-a \cdot H}, \quad (4.4)$$

где:

$$\eta = \frac{\bar{S} \cdot \beta \cdot P_s \cdot (1 - \varphi_0)}{w_0^c}. \quad (4.5)$$

Уравнение (4.4) можно представить в виде:

$$\frac{1 - \frac{w^c}{w_0^c}}{\tau} = \eta \cdot e^{-a \cdot H}. \quad (4.6)$$

обозначим

$$\frac{1 - \frac{w^c}{w_0^c}}{\tau} = y,$$

тогда,

$$y = \eta \cdot e^{-a \cdot H}. \quad (4.7)$$

Прологарифмируя уравнение (4.7) получим:

$$\ln(y) = \ln(\eta) - a \cdot H \cdot \ln(e),$$

или

$$\ln(y) = \ln(\eta) - a \cdot H. \quad (4.8)$$

Для описания кинетики процесса фильтрационной сушки измельченных стеблей хлопчатника с помощью уравнения (4.4) необходимо определить кинетические коэффициенты “ η ” и “ a ”, которые определяются экспериментально, путем построения графической зависимости $\ln(y)=f(H)$. Из графической зависимости, значение кинетического коэффициента “ a ” определяют как тангенс угла наклона прямой к оси абсцисс, а величину $\ln(y)$ – по отрезку, который прямая отсекает на оси ординат, откуда находят значение коэффициента “ η ” [143, с309; 144, с.57].

Уравнение (4.4) решено относительно “ η ”

$$\eta = \frac{1 - \frac{w^c}{w_0^c}}{\tau \cdot e^{-a \cdot H}}. \quad (4.9)$$

Для определения значений критического влагосодержания $w_{кр}$ и критического времени $\tau_{кр}$ при различных температурах и скоростей фильтрации теплового агента можно пользоваться методом, описанным [10, с.321], который заключается в построении кинетических кривых:

$$\lg(w^c - w_p^c) = f(\tau).$$

где, w^c, w_p^c - соответственно, текущее и равновесное значение влагосодержания материала; кг H_2O /кг сух.мат.

τ - время сушки, с.

В периоде полного насыщения теплового агента влагой изменение влажности материала лимитируется внешними условиями сушки – скоростью движения и температурой теплового агента.

Поэтому “ η ” может быть представлен в общем виде уравнением:

$$\eta = A \cdot t^m \cdot v_0^n. \quad (4.10)$$

Коэффициент "А" и показатели степеней “m”, “n” уравнения (4.10) определяют на основе обобщения результатов экспериментальных исследований, проведенных при различных режимных параметрах сушки измельченных стеблей хлопчатника, и являются постоянными для данного материала.

Следовательно, кинетическое уравнение (4.4) с учетом зависимости (4.10) может быть представлен в виде:

$$\frac{w}{w_0} = 1 - A \cdot t^m \cdot v_0^n \cdot \tau \cdot e^{-a \cdot H}. \quad (4.11)$$

Получение уравнения (4.11), позволит прогнозировать кинетику фильтрационной сушки измельченных стеблей хлопчатника в периоде полного насыщения теплового агента влагой в пределах изменения влагосодержания измельченных стеблей хлопчатника [144, с.58]

$$w_0^c \geq w^c \geq w_{кр}^c.$$

Обобщение кинетики сушки в периоде частичного насыщения теплового агента влагой проводили согласно уравнения [10, с.314]:

$$-\frac{dw^c}{d\tau} = K \cdot (w^c - w_p^c), \quad (4.12)$$

где K – коэффициент сушки, 1/с, который можно представить в виде:

$$K = \chi \cdot N, \quad (4.13)$$

где χ - относительный коэффициент сушки, кг H₂O/кг сух.мат.;

N - скорость сушки в периоде полного насыщения теплового агента влагой, кг H₂O/кг сух.мат.

Интегрируя уравнение (4.12) получим уравнение:

$$\frac{w^c - w_p^c}{w_{кр}^c - w_p^c} = e^{-K \cdot (\tau - \tau_{кр})}. \quad (4.14)$$

Учитывая, что $K = \chi \cdot N$, уравнение (4.14) может быть записано в виде:

$$\frac{w^c - w_p^c}{w_{кр}^c - w_p^c} = e^{-\chi \cdot N \cdot (\tau - \tau_{кр})}. \quad (4.15)$$

Прологарифмируя уравнение (4.14) получено [144, с.58]:

$$\ln \frac{w^c - w_p^c}{w_{кр}^c - w_p^c} = -K \cdot (\tau - \tau_{кр}). \quad (4.16)$$

Для нахождения коэффициента сушки K необходимо построить графическую зависимость в координатах:

$$\ln \left(\frac{w^c - w_p^c}{w_{кр}^c - w_p^c} \right) = f(\tau - \tau_{кр}),$$

из которой данный коэффициент определяют как тангенс угла наклона прямой к оси абсцисс.

Для проведения обобщения кинетики процесса фильтрационной сушки измельченных стеблей хлопчатника в периоде частичного насыщения теплового агента влагой учитываем, что $K = \chi \cdot N$. Необходимым является расчет скорости сушки в периоде полного насыщения теплового агента влагой N и определить относительный коэффициент сушки χ .

Скорость сушки в периоде полного насыщения теплового агента влагой можно определить по уравнению [144, с.59]:

$$N = \frac{w_0^c - w_{кр}^c}{\tau_{кр}} = \frac{(w_0^c - w_{кр}^c) \cdot \eta \cdot e^{-a \cdot H}}{1 - w_{кр}^c / w_0^c}. \quad (4.17)$$

Для определения относительного коэффициента сушки χ экспериментальные данные необходимо представить в виде зависимости $K=f(N)$, откуда значение χ определяют как тангенс угла наклона прямой к оси абсцисс.

Уравнение (4.15) можно представить в виде:

$$w^c = (w_{кр}^c - w_p^c) \cdot e^{-\chi \cdot N \cdot (\tau - \tau_{кр})} + w_p^c. \quad (4.18)$$

В связи с тем, что $\tau_{кр} = f(w_{кр}^c)$, $\tau_{кр} = \frac{w_0^c - w_{кр}^c}{N}$ (на основе уравнения (4.17)) то уравнение (4.18) можно записать в виде:

$$w^c = (w_{кр}^c - w_p^c) \cdot e^{-\chi \cdot N \cdot \left(\tau - \frac{w_0^c - w_{кр}^c}{N} \right)} + w_p^c. \quad (4.19)$$

Итак, зависимости (4.18), (4.19) позволяют обобщить результаты экспериментальных исследований, а именно рассчитать изменение влагосодержания измельченных стеблей хлопчатника во времени в периоде частичного насыщения теплового агента влагой до достижения материалом равновесного влагосодержания.

Для проектирования оборудования для реализации фильтрационной сушки измельченных стеблей хлопчатника важным является определение времени сушки. Время достижения измельченными стеблями хлопчатника критической влажности можно определить, предложив зависимость (4.4) в другом виде и

приняв, что $w^c = w_{кр}^c$, и $\tau = \tau_{кр}$:

$$\tau_{кр} = \frac{\left(1 - \frac{w_{кр}^c}{w_0^c}\right)}{\eta \cdot e^{-a \cdot H}}. \quad (4.20)$$

Зависимость (4.20) с учетом зависимости (4.10) проведя ряд алгебраических преобразований можно представить в таком виде:

$$\tau_{кр} = \frac{w_0^c - w_{кр}^c}{w_0^c \cdot A \cdot t^n \cdot v_0^m \cdot e^{-a \cdot H}}, \quad (4.21)$$

а время сушки определяется в периоде частичного насыщения теплового агента влагой согласно зависимости:

$$\tau_{II} = \frac{1}{\chi \cdot N} \cdot \left[1 + \ln \chi \cdot (w^c - w_{кр}^c)\right]. \quad (4.22)$$

Общее время фильтрационной сушки измельченных стеблей хлопчатника от начального влагосодержания до конечного можно рассчитать согласно зависимости:

$$\tau = \tau_I + \tau_{II} = \frac{(w_0^c - w_{кр}^c)}{(w_0^c \cdot A \cdot t^n \cdot v_0^m \cdot e^{-a \cdot H})} + \frac{1}{\chi \cdot N} \cdot (1 + \ln \chi (w^c - w_{кр}^c)). \quad (4.23)$$

Относительную погрешность между рассчитанными и экспериментальными значениями определяли по формуле [13, с.842]:

$$\Delta = \left| \frac{X_e - X_m}{X_e} \right|, \quad (4.24)$$

где: Δ -значение относительной погрешности;

X_m – рассчитанное значение;

X_e – усредненное экспериментальное значение.

4.2 Экспериментальное исследование кинетики фильтрационной сушки измельченных стеблей хлопка

Результаты экспериментальных исследований кинетики фильтрационной сушки измельченных стеблей хлопчатника при разных температурах и скоростях фильтрации теплового агента, а также при разных высотах стационарного слоя приведены на рисунках 4.1–4.3 [144, с.60].

На рисунке 4.1 приведена кинетика фильтрационной сушки измельченных стеблей хлопчатника при различных скоростях фильтрования теплового агента.

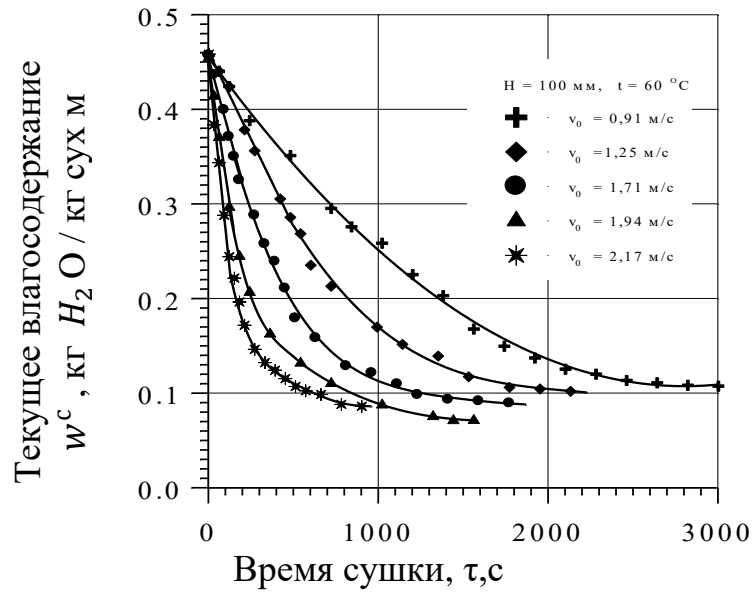


Рисунок 4.1 - Кинетика фильтрационной сушки измельченных стеблей хлопка при различных скоростях движения теплового агента

На рисунке 4.2 представлена кинетика фильтрационной сушки измельченных стеблей хлопка при разных температурах теплового агента [144, с.61].

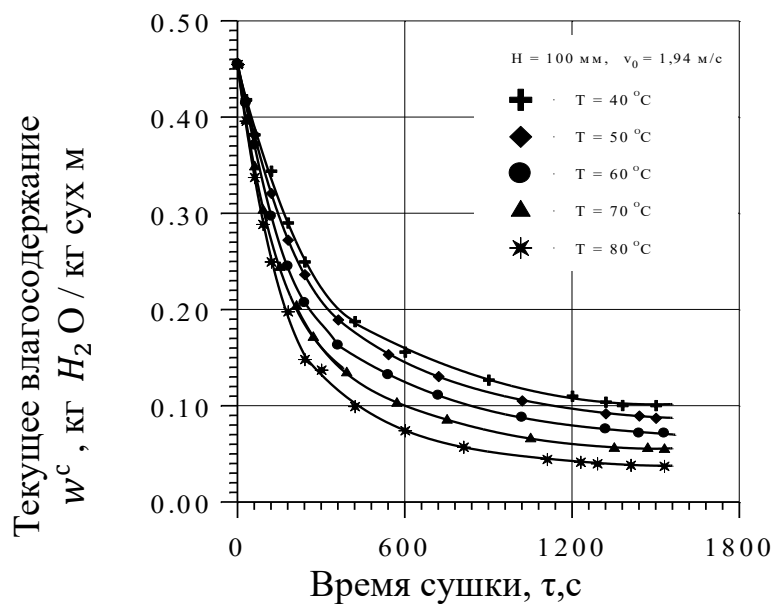


Рисунок 4.2 - Кинетика фильтрационной сушки измельченных стеблей хлопка при различных температурах теплового агента

На рисунке 4.3 представлена кинетика фильтрационной сушки измельченных стеблей хлопка при различных высотах стационарного слоя.

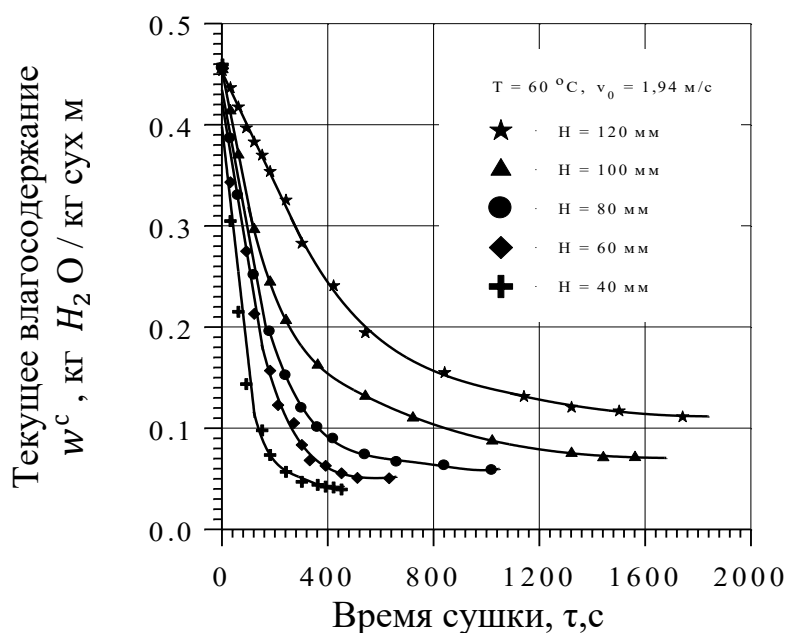


Рисунок 4.3 - Кинетика фильтрационной сушки измельченных стеблей хлопка при различных высотах стационарного слоя

Обобщение результатов кинетики фильтрационной сушки измельченных стеблей хлопка и определение кинетических коэффициентов позволяют рассчитать основные размеры сушильной установки, обосновать оптимальные технологические параметры процесса в зависимости от необходимой производительности [144, с.61].

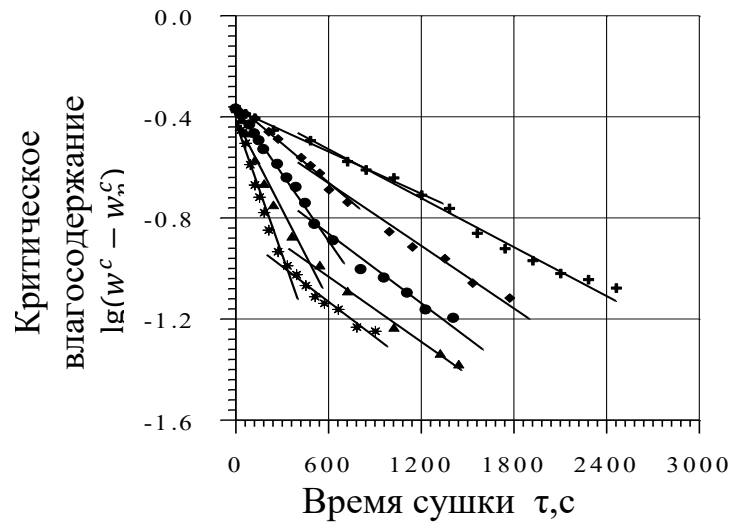
Как видно из графических зависимостей (рисунки 4.1-4.3), кинетические кривые фильтрационной сушки измельченных стеблей хлопка характеризуются выраженными двумя периодами. Первый, это период полного насыщения теплового агента влагой и вторым периодом частичного насыщения теплового агента влагой, поэтому обобщение результатов исследований проводили в соответствии с кинетическими зависимостями (4.22), (4.23).

4.3 Обобщение экспериментальных исследований кинетики в периодах полного и частичного насыщения теплового агента влагой

Для проведения обобщений кинетики согласно предложенных зависимостей, необходимым является определение критического влагосодержания $w_{кр}$ и критического времени $\tau_{кр}$, для чего пользовались выше приведенной методикой, которая заключается в построении кинетических кривых в координатах $lg(w-w_p)=f(\tau)$. Результаты кинетики фильтрационной сушки измельченных стеблей хлопка, представляли в виде графических зависимостей в соответствующих координатах, которые приведены на рисунках 4.4–4.6 [144, с.62].

Как видно из графических зависимостей (рисунки 4.4-4.6), периоды полного и частичного насыщения теплового агента влагой можно обобщить прямыми линиями. Ордината точки пересечения которых будет соответствовать критическому влагосодержанию $lg w_{кр}^c$ а абсцисса - критическому времени $\tau_{кр}$, то есть времени сушки измельченных стеблей

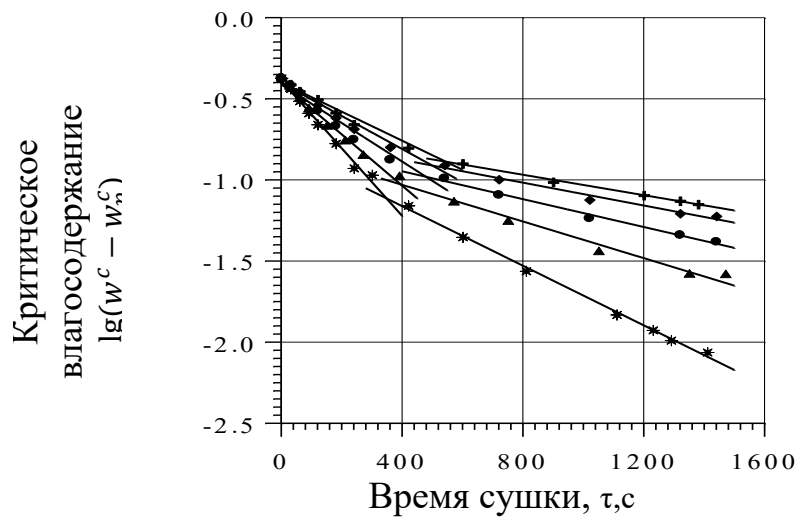
хлопчатника в периоде полного насыщения теплового агента влагой.



Условия опытов: $H=100$ мм, $T=60$ °С.

■ $-v_0 = 0,91$ м/с; ■ $-v_0 = 1.25$ м/с; ● $-v_0 = 1.71$ м/с;
▲ $-v_0 = 1.94$ м/с; ★ $-v_0 = 2,17$ м/с.

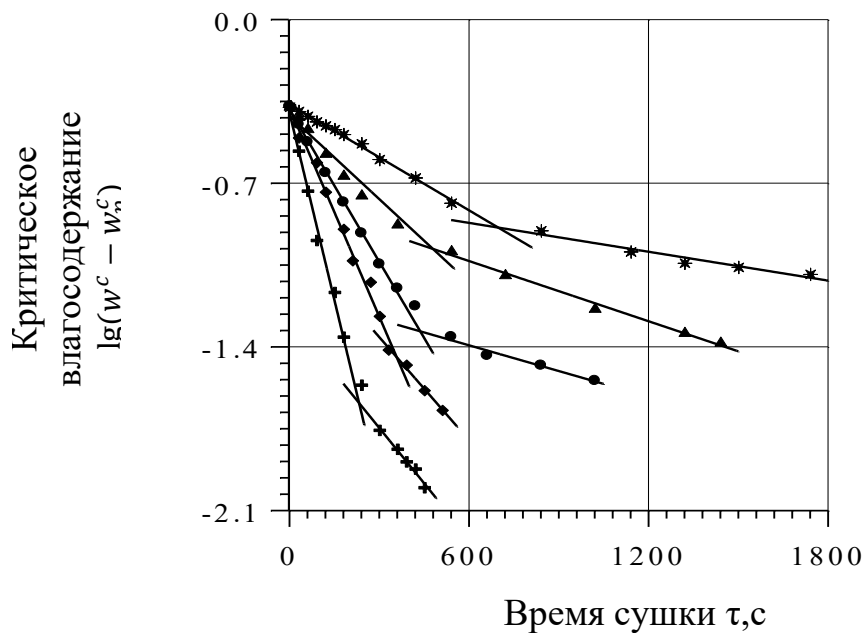
Рисунок 4.4 - Определение критического влагосодержания при различных скоростях фильтрации теплового агента



Условия опытов: $H=100$ мм, $v_0 = 1.94$ м/с.

■ $-T=40$ °С; ■ $-T=50$ °С; ● $-T=60$ °С; ▲ $-T=70$ °С; ★ $-T=80$ °С.

Рисунок 4.5 - Определение критического содержания влаги при различных температурах теплового агента



Условия опытов: $v_0 = 1.94$ м/с, $T=60$ °С.

■ - $H=40$ мм; ● - $H=60$ мм; ▲ - $H=80$ мм; ◆ - $H=100$ мм; ★ - $H=120$ мм.

Рисунок 4.6 - Определение критического влагосодержания при различных высотах стационарного слоя измельченных стеблей хлопка

Значение критического влагосодержания рассчитывали согласно зависимости:

$$w_{кр}^c = 10^x + w_p^c, \quad (4.24)$$

где x – ордината точки пересечения двух прямых, соответствующих периодам полного и частичного насыщения теплового агента влагой.

Для использования зависимости (4.24) необходимо значение равновесного влагосодержания измельченных стеблей хлопка w_p^c . Равновесное влагосодержание в диапазоне температур, при которых проводили исследование $w_p^c = f(\tau)$, определяли экспериментальным путем. Он составляет 0,03 кг H₂O/кг сух.мат. [144, с.62].

Из рисунков 4.4-4.6 установлено критическое влагосодержание и время его достижения. Результаты приведены в таблице 4.1.

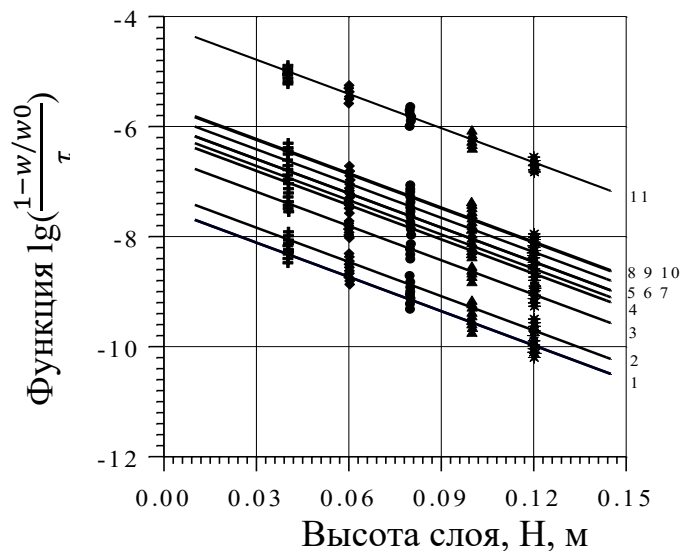
Анализ таблицы 4.1 показывает, что критическое влагосодержание измельченных стеблей хлопка зависит как от температуры и скорости фильтрования теплового агента, так и высоты стационарного слоя. Это объясняется тем, что фильтрационная сушка носит зональный характер и перемещения зоны тепломассообмена зависит как от технологических параметров теплового агента, так и от высоты слоя влажного материала [144, с.63].

Для того, чтобы описать кинетику фильтрационной сушки измельченных стеблей хлопка в периоде полного насыщения теплового агента влагой с помощью уравнения (4.14) необходимо определить кинетические

коэффициенты α и η . Эти коэффициенты определяют из экспериментальных данных, путем построения графической зависимости в координатах $\ln(1 - w^c/w_0^c)/\tau = f(H)$ (рисунок 4.7) [144, с.64].

Таблица 4.1 - Значение критического влагосодержания $w_{кр}$ и времени его достижения $\tau_{кр}$

H, мм	v_0 , м/с	t , °C	$\lg(w-w_p)$	$W_{кр}$	$\tau_{кр}$
1	2	3	4	5	6
40	1,94	60	-1,54	0,059	220
60			-1,43	0,067	360
80			-1,26	0,085	420
100			-0,98	0,135	480
120			-0,89	0,159	690
100	0,91		-0,62	0,270	900
	1,25		-0,77	0,200	800
	1,71		-0,94	0,145	660
	1,94		-0,98	0,135	480
	2,17		-1,01	0,128	360
	1,94		40	-0,9	0,156
		50	-0,92	0,150	518
		60	-0,98	0,135	480
		70	-1,04	0,121	400
		80	-1,11	0,108	358



Условия опытов : 1- $v_0 = 0.91$ м/с, $T=60$ °C; 2- $v_0 = 1.25$ м/с, $T=60$ °C; 3- $v_0 = 1.71$ м/с, $T=60$ °C; 4- $v_0 = 1.94$ м/с, $T=60$ °C; 5- $v_0 = 1.94$ м/с, $T=40$ °C; 6- $v_0 = 1.94$ м/с, $T=50$ °C; 7- $v_0 = 1.94$ м/с, $T=60$ °C; 8- $v_0 = 1.94$ м/с, $T=70$ °C; 9- $v_0 = 2.17$ м/с, $T=60$ °C; 10- $v_0 = 1.94$ м/с, $T=80$ °C; 11- $v_0 = 2.17$ м/с, $T=80$ °C;

Рисунок 4.7 - Графическая зависимость для определения коэффициентов “ α ” и “ η ” в периоде полного насыщения теплового агента влагой

Анализ рисунка 4.7 показывает, что все экспериментальные точки при

различных высотах стационарного слоя измельченных стеблей хлопка, температуры и скорости фильтрования теплового агента можно аппроксимировать прямыми линиями. Кроме этого все линии, приведенные на рисунке 4.8 являются параллельными между собой [144, с.64].

По тангенсам угла наклона прямых к оси абсцисс определяем значения кинетического коэффициента, которые являются одинаковыми и соответственно значение кинетического коэффициента составляет $a=20,74$ 1/м. Постоянство значения кинетического коэффициента "а" для измельченных стеблей хлопчатника можно также объяснить принимая во внимание зависимость (4.3), то есть с увеличением массовой скорости теплового агента возрастает коэффициент массоотдачи β .

Это определяет постоянство отношения β/m , что не противоречит физической сути процесса высушивания. Значения кинетических коэффициентов "η" также определяются из рисунка 4.7 на пересечении прямых с осью ординат. Рост значений кинетического коэффициента "η" во время роста температуры и скорости фильтрования теплового агента указывает на интенсификацию процесса фильтрационной сушки измельченных стеблей хлопчатника. Результаты определения коэффициентов "η" и "а" представлены в виде таблицы 4.2.

Таблица 4.2 - Зависимость кинетических коэффициентов η и а от параметров процесса

№ линии	t, °C	v ₀ , м/с	a, 1/м	lg(η)	η, 1/с
1	60	0,91	20,74	-5,42358	0,004411
2	60	1,25		-5,16442	0,005716
3	60	1,71		-4,49711	0,011141
4	60	1,94		-4,16319	0,015558
5	40	1,94		-4,10816	0,016438
6	50	1,94		-4,04016	0,017595
7	60	1,94		-3,89843	0,020274
8	70	1,94		-3,74898	0,023542
9	60	2.17		-3,56428	0,028317
10	80	1,94		-3,52793	0,029366

Для определения неизвестных коэффициентов "А", показателей степеней "m" и "n" уравнение (4.10) составим систему из трех уравнений, решение которых даст возможность найти эти неизвестные значения [144, с.65].

$$\begin{cases} \eta_1 = A \cdot t_1^m \cdot v_{01}^n \\ \eta_2 = A \cdot t_2^m \cdot v_{02}^n \\ \eta_3 = A \cdot t_3^m \cdot v_{03}^n \end{cases} \quad (4.25)$$

В каждом уравнении системы значения температуры и скорости фильтрования теплового агента соответствуют параметрам, при которых проводилась фильтрационная сушка измельченных стеблей хлопчатника.

Значения коэффициентов “ η_1 ”, “ η_2 ” и “ η_3 ” определялись по уравнению (4.9). Для того, чтобы решить систему уравнений (4.25), ее представляли в логарифмическом виде:

$$\begin{cases} \ln \eta_1 = \ln A + m \cdot \ln t_1 + n \cdot \ln v_{01} \\ \ln \eta_2 = \ln A + m \cdot \ln t_2 + n \cdot \ln v_{02} \\ \ln \eta_3 = \ln A + m \cdot \ln t_3 + n \cdot \ln v_{03} \end{cases} \quad (4.26)$$

Решая систему уравнений (4.26), определили значение коэффициента “ A ”= $3,3 \cdot 10^{-4}$ и показателей степеней $m=0,54$ $n=2,8$, которые являются постоянными для данного материала. Взяв за основу зависимость (4.10) и подставив в нее определенные значения “ A ”, “ m ”, “ n ” получили зависимость, согласно которой определяют значение кинетического коэффициента “ η ”, для измельченных стеблей хлопчатника:

$$\eta = 3,3 \cdot 10^{-4} \cdot t^{0,54} \cdot v_0^{2,8} \quad (4.27)$$

Коэффициенты “ m ” и “ n ” показывают степень влияния температуры и скорости фильтрования теплового агента на значение коэффициента “ η ”, следовательно влияние скорости фильтрования теплового агента является более весомым. Поэтому на рост интенсивности процесса фильтрационной сушки измельченных стеблей хлопчатника в большей степени влияет рост скорости фильтрации теплового агента, его температуры, что подтверждают экспериментальные данные, представленные на рисунках 4.1-4.3.

С учетом зависимости (4.27) для определения кинетического коэффициента “ η ” и с учетом значения кинетического коэффициента “ a ” зависимость (4.11) можно представить в виде:

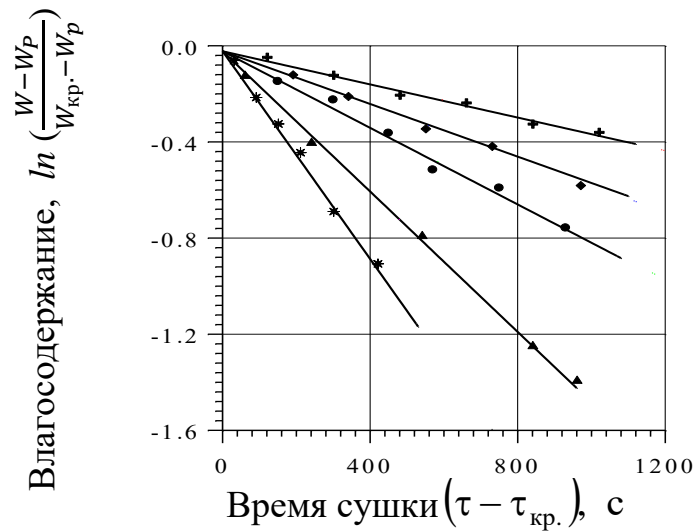
$$\frac{w^c}{w_0^c} = 1 - 3,3 \cdot 10^{-4} \cdot t^{0,54} \cdot v_0^{2,8} \cdot e^{-20,74 \cdot H}, \quad (4.28)$$

которая дает возможность прогнозировать интенсивность фильтрационной сушки измельченных стеблей хлопчатника в периоде полного насыщения теплового агента влагой и является справедливой до достижения измельченными стеблями хлопчатника критического влагосодержания $w_{кр}^c$.

Как уже отмечалось, кинетика в периоде частичного насыщения теплового агента влагой описывается уравнением (4.12), для использования которой необходимо значение коэффициента скорости сушки K . Для нахождения этого коэффициента K построим графическую зависимость в координатах [144, с.65].:

$$\ln \left(\frac{(w^c - w_p^c)}{(w_{кр}^c - w_p^c)} \right) = f(\tau - \tau_{кр}),$$

из которой данный коэффициент определим, как тангенс угла наклона прямой к оси абсцисс (рисунки 4.8–4.10).

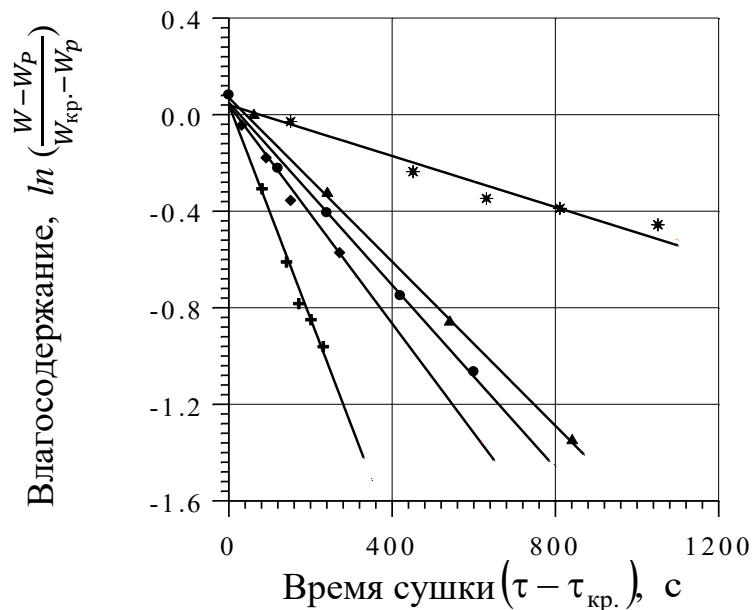


Условия опытов: $H=100$ мм, $T=60$ °С.

■ $-v_0 = 0,91$ м/с; ■ $-v_0 = 1.25$ м/с; ● $-v_0 = 1.71$ м/с;

▲ $-v_0 = 1.94$ м/с; ★ $-v_0 = 2,17$ м/с.

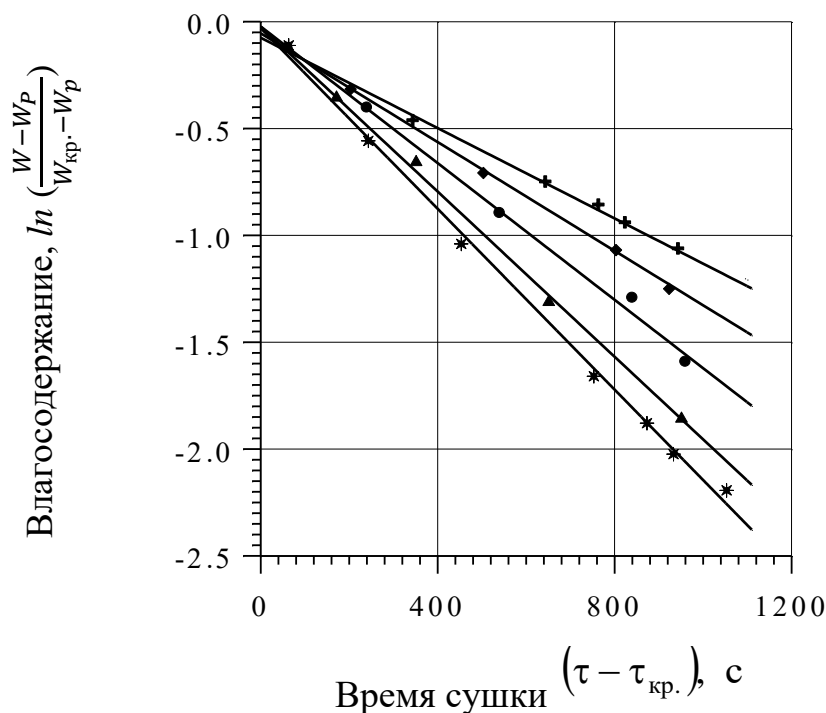
Рисунок 4.8 - Определение коэффициента скорости сушки в периоде падающей скорости влагоудаления при различных скоростях фильтрации теплового агента



Условия опытов: $v_0 = 1.94$ м/с, $T=60$ °С.

■ $-H=40$ мм; ■ $-H=60$ мм; ● $-H=80$ мм; ▲ $-H=100$ мм; ★ $-H=120$ мм.

Рисунок 4.9 - Определение коэффициента скорости сушки в периоде падающей скорости удаления влаги при различных высотах стационарного слоя измельченных стеблей хлопчатника



Условия опытов: $H=100$ мм, $v_0 = 1.94$ м/с.
 ■ - $T=40$ °С; ■ - $T=50$ °С; ● - $T=60$ °С; ▲ - $T=70$ °С; ★ - $T=80$ °С.

Рисунок 4.10 - Определение коэффициента скорости сушки в периоде падающей скорости удаления влаги при различной температуре теплового агента

Для обобщения кинетики процесса фильтрационной сушки, в период частичного насыщения теплового агента влагой, необходимо рассчитать скорость сушки периода полного насыщения теплового агента влагой N и определение относительного коэффициента сушки χ [144, с.65].

Таблица 4.3 - Зависимость K и N от параметров процесса фильтрационной сушки и высоты стационарного слоя измельченных стеблей хлопчатника

$N \cdot 10^3 \frac{\text{кг} \cdot \text{H}_2\text{O}}{(\text{кг} \cdot \text{сух. мат.} \cdot \text{с})}$	$K \cdot 10^3, 1/\text{с}$	$t, \text{ }^\circ\text{C}$	$H, \text{ м}$	$v_0, \text{ м/с}$
0,88	0,95	40	0,1	1,94
0,91	0,99	50		
1,18	1,26	60		
1,40	1,59	70		
1,44	1,71	80		
0,22	0,34	60	0,1	0,91
0,37	0,55			1,25
0,65	0,80			1,71
1,18	1,25			1,94
1,75	1,82			2,17
0,55	0,56		0,04	1,94
1,25	1,37		0,06	
1,47	1,65		0,08	
1,79	1,99		0,1	
3,46	3,68		0,12	

Скорость сушки измельченных стеблей хлопчатника в первом периоде N рассчитывают согласно зависимости (4.17) или определяют как тангенс угла наклона того участка кинетической кривой (рисунки 4.1-4.3), что соответствует периоду полного насыщения теплового агента влагой. В таблице 4.3 приведены рассчитанные значения K и N .

На основе таблицы 4.3 построена графическая зависимость $K=f(N)$ рисунок 4.11.

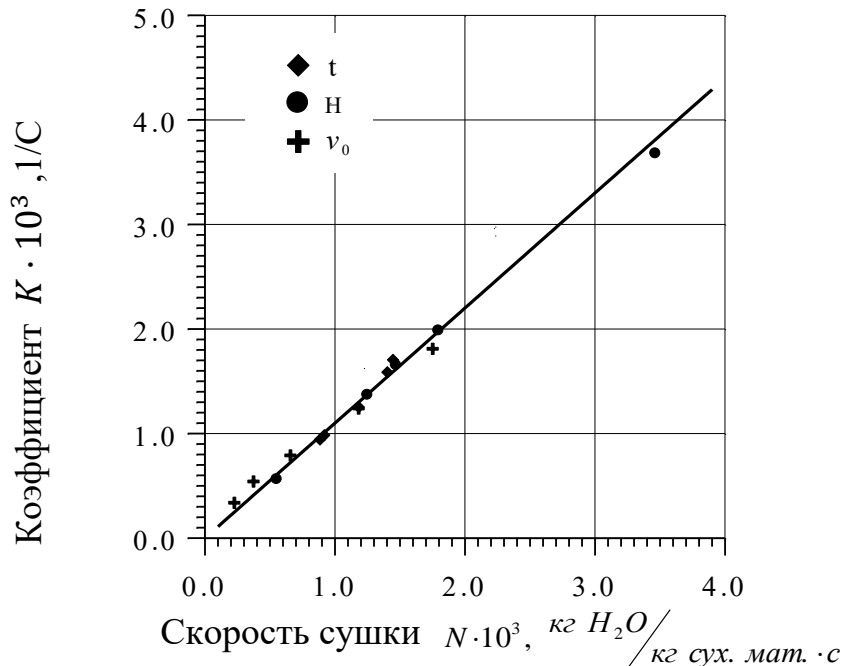


Рисунок 4.11 - Зависимость коэффициента K сушки от скорости сушки N в период полного насыщения теплового агента влажной для определения относительного коэффициента сушки χ

С учетом значения χ , зависимость (4.18) можно представить в виде:

$$w^c = (w_{kp}^c - w_p^c) \cdot e^{-1,1 \cdot N \cdot (\tau - \tau_{kp})} + w_p^c, \quad (4.29)$$

а зависимость (4.19) в виде уравнения:

$$w^c = (w_{kp}^c - w_p^c) \cdot e^{-1,1 \cdot N \cdot (\tau - \frac{(w_0^c - w_{kp}^c)}{N})} + w_p^c. \quad (4.30)$$

Полученная зависимость (4.30) позволяет обобщить результаты экспериментальных исследований, а именно рассчитать изменение влагосодержания стационарного слоя измельченных стеблей хлопчатника во времени до достижения равновесного влагосодержания с тепловым агентом [144, с.65].

4.4 Определение значений относительной погрешности и анализ результатов исследования кинетики фильтрационной сушки измельченных стеблей хлопка

На рисунке 4.12 построена корреляционная зависимость между экспериментальными данными и теоретически рассчитанными на основе зависимостей (4.28) и (4.30) для всех исследуемых температур и скоростей фильтрации теплового агента и высоты стационарного слоя $H = 100$ мм.

Как видно из рисунка 4.12, предложенные расчетные зависимости хорошо описывают процесс обезвоживания измельченных стеблей хлопчатника для всех исследуемых температур и скоростей фильтрации теплового агента для высоты стационарного слоя $H = 100$ мм. Абсолютное значение максимальной относительной погрешности не превышает 15,2 %, что вполне приемлемо для проектных расчетов установки фильтрационной сушки. Рациональным, с точки зрения использования в промышленности, принято высота стационарного слоя измельченных стеблей хлопчатника $H=100$ мм, учитывая необходимость обеспечения высокой производительности оборудования и рациональных затрат как тепловой энергии, так и энергии на создание перепада давлений. Рост высоты стационарного слоя более 100 мм приводит к росту потерь давления и к увеличению времени сушки и соответственно конструктивных размеров сушильной установки. Уменьшение толщины стационарного слоя измельченных стеблей хлопчатника ниже 100 мм, негативно повлияет как на производительность сушильного оборудования, так и на расход тепловой энергии вследствие короткого периода полного насыщения теплового агента влагой.

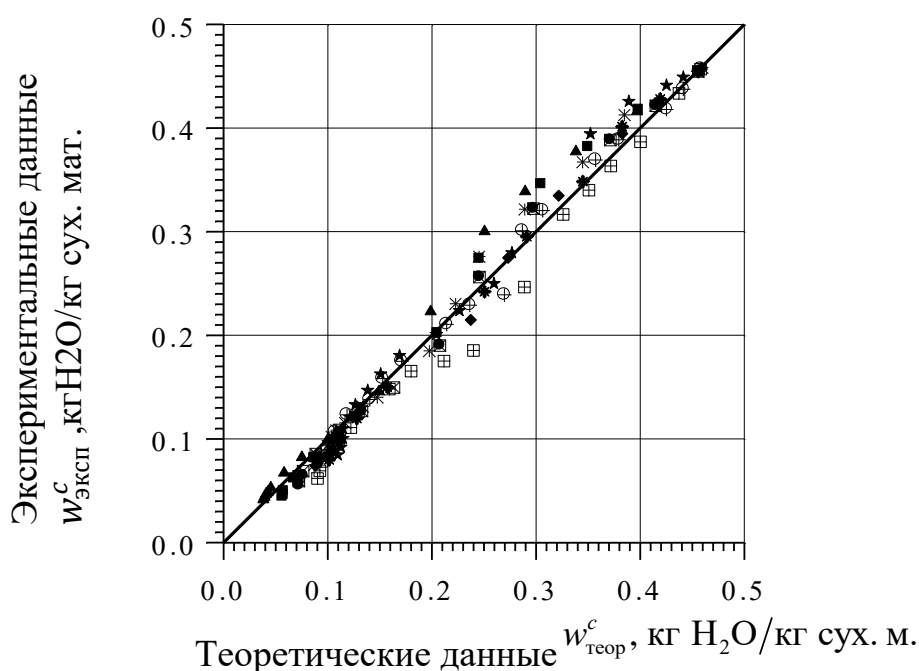


Рисунок 4.12 - Корреляционная зависимость между экспериментальными данными и теоретически рассчитанными

Как видно из рисунков 4.1-4.3, кинетические кривые являются подобными классическим кривым конвективной сушки и характеризуются наличием периода постоянной скорости сушки (первый период сушки) и периода падающей скорости сушки (второй период). Однако в связи с тем, что фильтрационная сушка носит зональный характер прямая линия на кинетических кривых характеризует период полного насыщения, а кривая линия – период частичного насыщения влагой теплового агента [144, с.66].

Анализ рисунка 4.1 свидетельствует, что уменьшение фиктивной скорости фильтрования теплового агента с 2,17 м/с до 0,91 м/с, то есть в 2,4 раза, приводит к тому, что при этом время высушивания измельченных стеблей хлопчатника до 0,1 кг H₂O/кг сух.мат. возрастает с 700 с до 3000 с, то есть в 4,3 раза. Это объясняется тем, что увеличение скорости фильтрования теплового агента приводит к росту коэффициентов тепло - и массоотдачи, и соответственно процесс сушки интенсифицируется. В производственных условиях для подачи сушильного агента используют вентиляторы высокого давления, а площадь зоны сушки будет составлять не менее 4 м², поэтому обеспечить скорость теплового агента более 2 м/с практически невозможно. Поэтому верхний предел скорости фильтрования теплового агента составлял 2,17 м/с. Анализ рисунка 4.2 показал, что увеличение температуры с 40°C до 80°C, то есть в 2 раза приводит к сокращению времени выдвигания влажных дробленых стеблей хлопчатника до 0,1 кг H₂O/кг сух.мат. с 1560 с до 420 с, то есть в 3,7 раза. Это объясняется тем, что в измельченных стеблях хлопчатника содержится в основном связанная влага, а рост температуры теплового агента приводит к увеличению коэффициентов молекулярной диффузии. Вместе с этим увеличение температуры теплового агента приводит к росту потерь тепловой энергии с отработанным тепловым агентом, и высушенным материалом, который выгружается из сушильной установки. Также есть потери тепловой энергии в окружающую среду с поверхности корпуса сушильной установки, что требует увеличения толщины теплоизолирующего слоя и приводит к росту капитальных затрат на ее изготовление. Поэтому верхним пределом температуры теплового агента выбрано 80 °С.

Анализ рисунка 4.3 указывает на то, что увеличение высоты стационарного слоя измельченных стеблей хлопчатника в 3 раза приводит к росту времени высушивания в 12,5 раз.

Учитывая, что фильтрационная сушка носит зональный характер, рост высоты стационарного слоя приводит к росту времени перемещения зоны тепломассообмена. Тепловой агент, фильтруясь через стационарный слой материала, отдает часть теплоты уже высушенным частицам стеблей хлопчатника, поэтому температура теплового агента по высоте слоя уменьшается, и увеличивается время сушки с ростом высоты слоя. Кроме этого, верхние слои материала, с ростом общей высоты слоя, нагреваются до более высоких температур, потому что, значительно дольше контактируют с тепловым агентом, что приводит непродуктивным затратам энергии. Поэтому верхней границей высоты стационарного слоя измельченных стеблей

хлопчатника выбрано 120 мм [144, с.66].

Особенность предлагаемого метода состоит в том, что фильтрационная сушка относится к высокоинтенсивным методам высушивания влажных материалов благодаря тому, что тепловой агент фильтруется через слой дисперсного материала. При этом площадь контакта теплового агента с влажным материалом, коэффициенты теплообмена и степень насыщения теплового агента влагой значительно больше, чем при конвективной сушке или в кипящем слое. Поэтому для высушивания влажных материалов фильтрационным методом используют значительно более низкую температуру теплового агента, чем при конвективной сушке, что положительно влияет как на энергетические затраты, так и качество готового продукта.

Расчетные зависимости справедливы лишь в пределах изменения скорости фильтрации теплового агента 0,91–2,17 м/с, температур теплового агента 40–80°C и высоты стационарного слоя 40–120 мм. Полученные результаты исследования кинетики фильтрационной сушки измельченных стеблей хлопчатника касаются оборудования, на котором проводили экспериментальные исследования. В этих результатах не учтены затраты теплоты в окружающую среду, а также затраты теплоты на нагрев транспортных механизмов и другого технологического оборудования. Полученные расчетные зависимости коэффициента сушки K от скорости сушки N в период полного насыщения теплового агента влагой целесообразно использовать при проектных расчетах сушильного оборудования. Однако во время пусконаладочных работ спроектированного сушильного оборудования без сомнения необходимо будет провести дополнительные экспериментальные исследования для оптимизации процесса высушивания измельченных стеблей хлопчатника [144, с.66].

Для проектирования оборудования для реализации процесса фильтрационной сушки измельченных стеблей хлопчатника необходимы зависимости, которыми было бы удобно пользоваться для расчета времени сушки.

Критическое время сушки $\tau_{кр}$ можно определить, используя графические зависимости (рисунки 4.4–4.6), или рассчитать на основе зависимости (4.21):

$$\tau_I = \frac{(w^c - w_{кр}^c)}{w_0^c \cdot 3,3 \cdot 10^{-4} \cdot t^{0,54} \cdot v_0^{2,8} \cdot \tau \cdot e^{-20,74 \cdot H}}, \quad (4.31)$$

а время сушки в периоде частичного насыщения теплового агента влагой согласно зависимости (4.22):

$$\begin{aligned} \tau_{II} &= \frac{1}{\chi \cdot N} \cdot (1 + \ln \chi (w^c - w_k^c)) = \\ &= \frac{1}{(1,1 \cdot w_0^c \cdot 3,3 \cdot 10^{-4} \cdot t^{0,54} \cdot v_0^{2,8} \cdot \tau \cdot e^{-20,74 \cdot H})} \times (1 + \ln(1,1 \cdot N \cdot (w^c - w_k^c))). \end{aligned} \quad (4.32)$$

Общее время фильтрационной сушки измельченных стеблей хлопчатника от начального влагосодержания стеблей до конечного можно рассчитать, как

сумму зависимостей (4.31) и (4.32).

Учитывая то, что влага в измельченных стеблях хлопчатника является связанной и испаряется из внутренних слоев частицы к поверхности путем молекулярной диффузии, целесообразно было бы определить коэффициент диффузии влаги в зависимости от температуры теплового агента. Определение коэффициента внутренней диффузии во время фильтрационной сушки дало бы возможность более точно выбирать рациональные параметры теплового агента как с точки зрения его температуры, так и его расходы.

Таким образом, теоретически проанализирована кинетика сушки влажных материалов. Проведены обобщения экспериментальных исследований кинетики фильтрационной сушки измельченных стеблей хлопчатника. Получена

зависимость $\frac{w^c}{w_0^c} = 1 - 3,3 \cdot 10^{-4} \cdot t^{0,54} \cdot v_0^{2,8} \cdot e^{-20,74 \cdot H}$, с помощью которой можно обобщить

кинетику фильтрационной сушки в периоде полного насыщения теплового агента влагой в пределах изменения влагосодержания измельченных стеблей хлопчатника [144, с.66].

Экспериментально исследована кинетика фильтрационной сушки измельченных стеблей хлопчатника при разных температурах и скоростях фильтрации теплового агента, а также при разных высотах стационарного слоя. Результаты экспериментальных исследований показывают, что процесс происходит в периодах полного и частичного насыщения теплового агента влагой.

Полученные зависимости $w^c = (w_{kp}^c - w_p^c) \cdot e^{-1,1 \cdot N \cdot (\tau - \tau_{kp})} + w_p^c$ и $w^c = (w_{kp}^c - w_p^c) \cdot e^{-1,1 \cdot N \cdot (\tau - \frac{(w_0^c - w_{kp}^c)}{N})} + w_p^c$ позволяют рассчитать изменение влагосодержания измельченных стеблей хлопчатника во времени в периоде частичного насыщения теплового агента влагой до достижения измельченных стеблей хлопчатника равновесного с тепловым агентом влагосодержания.

Сравнение экспериментальных данных с теоретически рассчитанными по зависимостям показали, что максимальное абсолютное значение относительной погрешности не превышает 15,2 %.

4.5 Процессы тепломассообмена при фильтрационной сушке измельченных стеблей хлопка

С целью дальнейшей интенсификации процесса фильтрационной сушки измельченных стеблей хлопка, проведены экспериментальные исследования, направленные на определение коэффициентов теплоотдачи от теплового агента к сухим и влажным частицам измельченных стеблей хлопка и коэффициентов массоотдачи от влажных частиц к тепловому агенту при разных скоростях движения последнего [145, с.162].

Исследование тепломассообмена между тепловым агентом и частицами измельченных стеблей хлопка проводились на экспериментальной установке, изображенной на рис. 2.3 и по методикам, описанным во второй главе. Согласно представленной методике, через слой материала профильтровывали, с

заданной температурой и различными скоростями тепловой агент. Эксперименты проводили в «коротком» слое материала, высота которого составляла $H=10\text{мм}$ для обеспечения равномерной фильтрации теплового агента по всей плоскости контейнера и чтобы температура теплового агента была примерно постоянной по высоте слоя. Температура над слоем материала поддерживалась в пределах 80°C с точностью $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Температура на выходе из слоя измельченных стеблей подсолнечника записывалась в автоматическом режиме с помощью восьмиканального измерителя температуры РТ8-1000 с выводом информации на персональный компьютер в файл данных.

Экспериментально определены усредненные значения температуры теплового агента на выходе из слоя сухих измельченных стеблей хлопка при скоростях движения теплового агента от $0,68$ до $2,05$ м/с, которые приведены на рис. 4.13. Значения скоростей теплового агента избраны с учетом скоротечности процесса нагрева частиц измельченных стеблей хлопка.

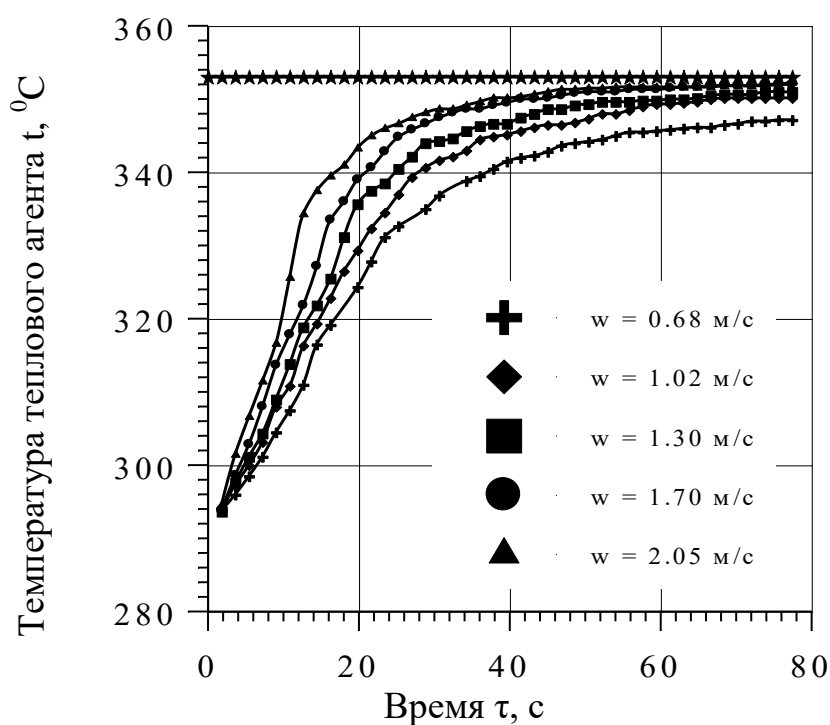


Рисунок 4.13- Изменение температуры теплового агента на выходе из слоя сухих измельченных стеблей хлопка при разных скоростях движения последнего (высота слоя материала $H=10$ мм)

Как видно из рис. 4.13, увеличение скорости теплового агента приводит к интенсификации процесса теплообмена, поскольку в слой материала вносится большее количество тепла за определенный промежуток времени. Представленные графические зависимости изменения температуры теплового агента на выходе из слоя материала дают возможность определить коэффициент теплоотдачи от теплового агента к сухим частицам измельченных стеблей хлопка согласно зависимости (1.15). Для использования зависимости (1.15), необходимы значения среднеарифметической температуры теплового

агента на входе и выходе из слоя материала \bar{t} , средней температуры поверхности частиц \bar{T}_n , времени проведения эксперимента $\Delta\tau$ и количества теплоты ΔQ , который затрачивается на нагрев материала. В нашем случае, значение \bar{t} принималось как среднеарифметическая температура теплового агента на входе и выходе из слоя согласно замерам, приведенным на рис. 4.13, а величина $\Delta\tau$ – определялась экспериментально, как длительность эксперимента. Согласно уравнению теплового баланса рассчитывали значения количества теплоты ΔQ , который затрачивается на нагрев материала [145, с.163].

Сложность применения зависимости (1.15) состоит в том, что экспериментально измерить среднюю температуру поверхности \bar{T}_n частиц измельченных стеблей хлопка невозможно, поэтому для ее расчета из уравнения теплового баланса определялась средняя температура частиц \bar{T} :

$$\Delta Q = m \cdot c_s \cdot (\bar{T} - T_0) \quad (4.33)$$

где, ΔQ – количество теплоты, остающейся в слое измельченных стеблей хлопка, Дж;

T_0 – начальная температура частиц измельченных стеблей хлопка, К;

m – масса частиц измельченных стеблей хлопка в слое, кг;

c_s – теплоемкость сухих частиц измельченных стеблей хлопка.

Очевидно, что средняя температура \bar{T}_n поверхности частиц больше средней температуры частиц \bar{T} . Учитывая то, что тепловой агент фильтруется сквозь слой измельченных стеблей хлопка и порозность слоя является высокой ($\varepsilon_w = 0,4 \text{ м}^3/\text{м}^3$), принято допущение, что частицы материала омываются тепловым агентом со всех сторон равномерно и температура теплового агента является одинаковой со всех сторон частиц а также, что распределение температурного поля по объему частицы имеет параболический характер. С учетом вышесказанного, среднюю температуру \bar{T}_n на поверхности частицы определяли согласно зависимости [145, с.164]:

$$\bar{T}_n = t - \left(t - T_0 \cdot e^{-\mu_1^2 \cdot Fo} \right) \cdot \left(1 - \frac{r}{R} \right) \cdot e^{-\mu_1^2 \cdot Fo} \quad (4.34)$$

где t – температура теплового агента, К;

T_0 – начальная температура частиц измельченных стеблей хлопка, К;

R, r – средние радиусы частиц измельченных стеблей хлопка и текущий радиус соответственно ($0 < r \leq R$), м;

μ_1 – корень характеристического уравнения;

Fo – критерий Фурье.

Поэтому, на основе экспериментальных значений, приведенных на рис. 4.13, рассчитали значения коэффициентов теплоотдачи согласно зависимости (1.15), с учетом зависимостей для расчета количество теплоты, что остается в слое материала (4.33) и зависимости (4.34) для определения средней температуры на поверхности частиц.

Рассчитанные значения коэффициентов теплоотдачи от теплового агента к слою сухих частиц измельченных стеблей хлопка при различных скоростях теплового агента представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4- Значение коэффициентов теплоотдачи α от теплового агента к слою сухих частиц измельченных стеблей хлопка при различных скоростях теплового агента

$\nu, \text{м/с}$	1	1,5	2,0	2,5	3
$\alpha, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	300	445	540	620	750

Согласно значений в таблице 4.4. построена графическая зависимость, которая представлена на рис. 4.14.

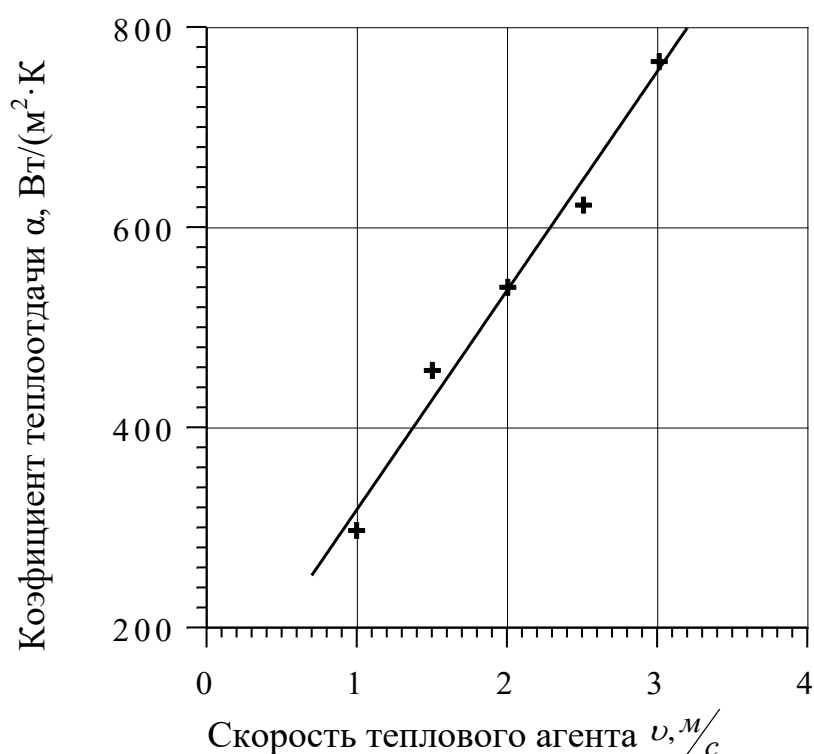


Рисунок 4.14- Зависимость коэффициента теплоотдачи α от теплового агента к слою сухих частиц измельченных стеблей хлопка при действительной скорости ν фильтрации теплового агента

Как было отмечено в третьей главе, гидродинамическая картина движения теплового агента через слой измельченных стеблей хлопка является чрезвычайно сложной, поскольку каналы, образованные промежутками между частицами материала по высоте слоя меняют свое направление и площадь

поперечного сечения, что вызывает постоянную смену скорости теплового агента, а также коэффициента теплоотдачи. Поэтому, полученные значения коэффициентов теплоотдачи являются усредненными по слою измельченных стеблей хлопка.

Как видим из графической зависимости (рис. 4.14), полученные нами экспериментальные значения коэффициента теплоотдачи от теплового агента к сухим частицам измельченных стеблей хлопка α в зависимости от действительной скорости фильтрования v аппроксимируются прямой линией. Рост скорости приводит к интенсификации процесса теплообмена. Это объясняется тем, что при большей скорости фильтрования через каналы между частицами профильтровывается большее количество теплового агента и в слой материала поступает большее количество теплоты. Следовательно, увеличивая скорость фильтрации теплового агента через слой дисперсного материала в научно обоснованных пределах можно достичь значительной интенсификации процесса теплообмена при реализации фильтрационной сушки [145, с.165].

Обобщение экспериментальных результатов теплообмена между тепловым агентом и слоем из частиц сухих стеблей хлопка проводили согласно зависимости (1.13). Учитывая, то, что физические параметры воздуха изменялись в узком диапазоне, согласно рекомендаций, приведенных в [66, с. 179] принимали что $Nu \sim Pr^{0,33}$, то есть показатель степени $m=0,33$. Для определения неизвестных опытных коэффициентов "А" и "n" в зависимости (1.13) экспериментальные значения представляли в логарифмической системе координат (рис. 4.15) в виде зависимости: $\frac{Nu}{Pr^{0,33}} = f(Re_e)$.

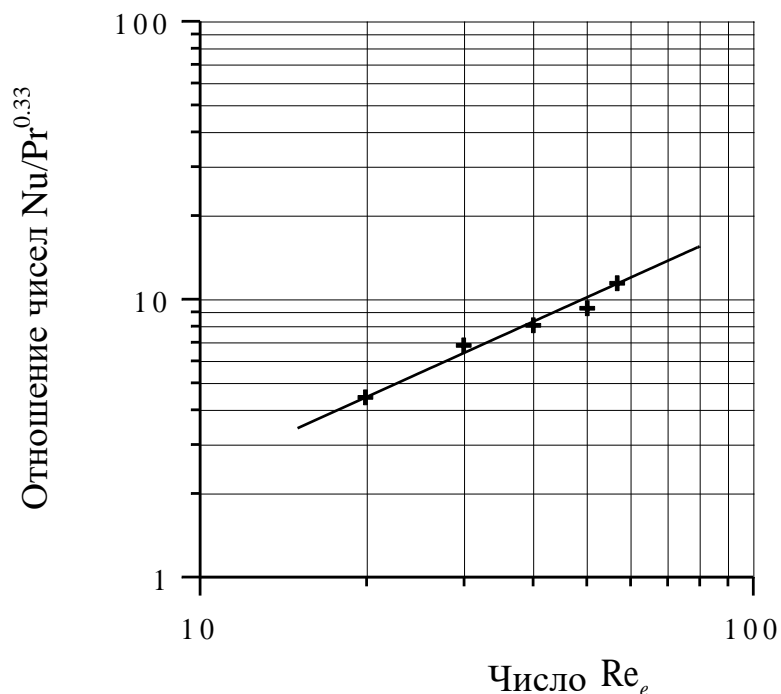


Рисунок 4.15- Зависимость $Nu/Pr^{0,33}$ для короткого слоя материала $H=10$ мм при температуре $80^{\circ}C$

Каждая точка на приведенной графической зависимости является средним арифметическим значением минимум трех экспериментов.

Из графической зависимости (рис. 4.15) определен коэффициент $A=0,35$ и показатель степени $n=0,88$, с учетом которых зависимость (1.13) можно представить в виде:

$$Nu = 0,35 \cdot Re_e^{0,88} \cdot Pr^{0,33} \quad (4.35)$$

Максимальная относительная погрешность между рассчитанными по зависимости (4.35) значениями коэффициентов теплоотдачи α от теплового агента к слою сухих частиц измельченных стеблей хлопка и экспериментальными данными, представленных в таблице 4.4 не превышает $\pm 8,7\%$ в пределах изменения числа Рейнольдса ($10 \leq Re \leq 100$). Полученная расчетная зависимость (4.35) дает возможность определить с достаточной точностью коэффициенты теплоотдачи во время фильтрации теплоносителя сквозь слой сухих стеблей хлопка, прогнозировать необходимые затраты тепловой энергии на этапе проектирования сушильного оборудования, а также выбрать рациональные параметры фильтрационного процесса сушки [145, с.166].

Коэффициенты теплоотдачи от теплового агента к влажным частицам измельченных стеблей хлопка при различных скоростях движения теплового агента рассчитывали согласно зависимости (1.14). Рассчитанные значения коэффициентов теплоотдачи представлены в таблице 4.5 и согласно этих значений построена графическая зависимость, которая представлена на рис. 4.16.

Таблица 4.5 - Значение коэффициентов теплоотдачи α от теплового агента к слою влажных частиц измельченных стеблей хлопка при различных скоростях теплового агента

$v, \text{м/с}$	1,38	2,08	2,79	3,49	4,17
$\alpha, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	30,3	40,55	47,3	55,2	59,0

Аналогично как и для слоя сухого материала, коэффициент теплоотдачи линейно возрастает с ростом действительной скорости движения теплового агента, однако для влажного материала коэффициент теплоотдачи меньше, чем для сухого материала, при одинаковых гидродинамических условиях, что объясняется расходом теплоты только на испарение влаги в первом периоде сушки, температура влажного материала, при этом, остается постоянной и равна температуре мокрого термометра. Полученные значения коэффициентов теплоотдачи для влажных частиц материала являются усредненными по слою [145, с.167].

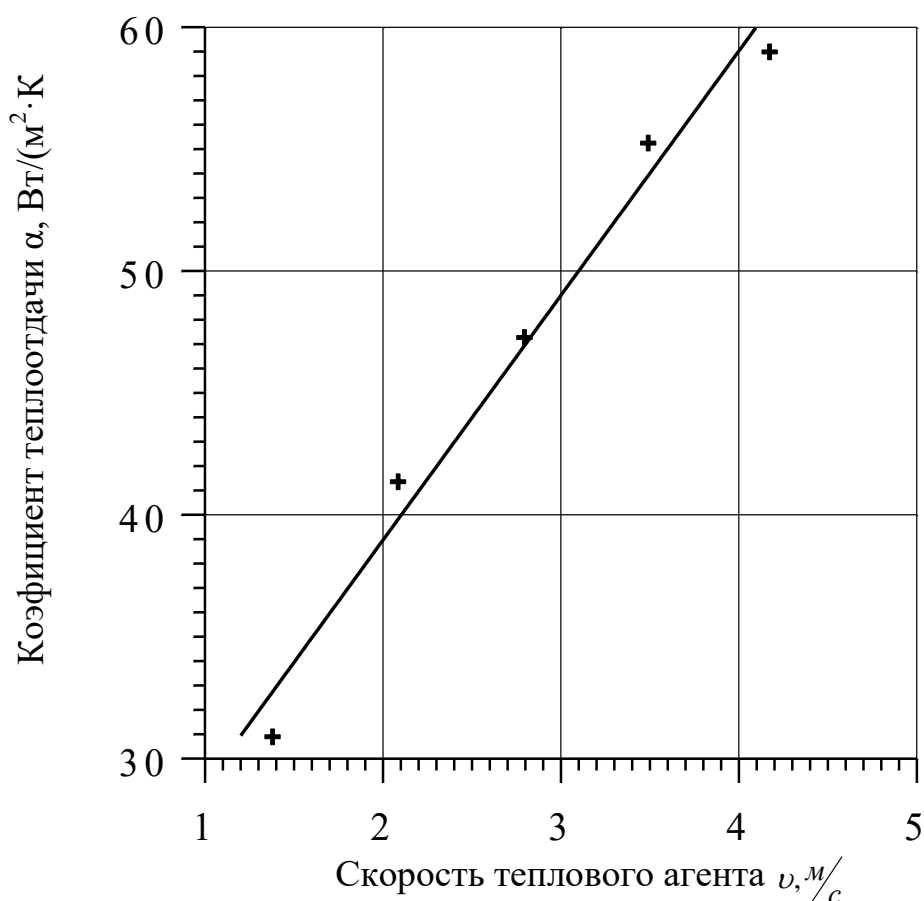


Рисунок 4.16- Зависимость коэффициентов теплоотдачи α от действительной скорости фильтрации теплового агента v для влажных измельченных стеблей хлопка

Коэффициенты массоотдачи от влажных частиц измельченных стеблей хлопка к тепловому агенту при различных скоростях движения последнего рассчитывали согласно зависимости (1.15). Рассчитанные значения коэффициентов массоотдачи представлены в таблице 4.6 и согласно этим значениям построена графическая зависимость, которая представлена на рис. 4.17.

Таблица 4.6- Значение коэффициентов массоотдачи β от влажных частиц измельченных стеблей хлопка к тепловому агенту при различных скоростях движения последнего

$v, м/с$	1,38	2,08	2,79	3,49	4,17
$\beta, м/с$	0,033	0,041	0,050	0,059	0,063

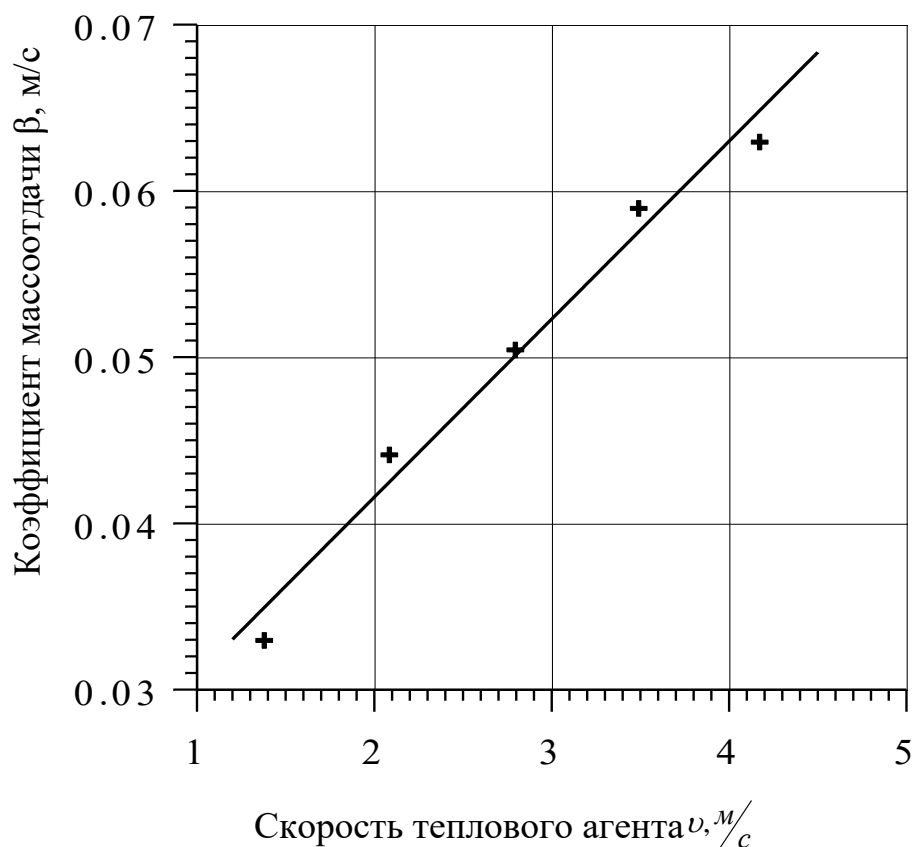


Рисунок 4.17-Зависимость коэффициентов массоотдачи β от влажных частиц измельченных стеблей хлопка к теплому агенту при различных скоростях движения

Обобщение результатов тепломассообмена при фильтрационной сушке измельченных стеблей хлопка (для влажного материала), проводили согласно зависимости (1.17) и (1.26). Согласно рекомендациям [72, с.526], принимали, что $Nu \sim Pr^{0,33}$, а $Sh \sim Sc^{0,33}$.

Для обобщения тепло массообмена результаты экспериментальных исследований приведем на одном рисунке в виде функциональных зависимостей $\frac{Nu}{Pr^{0,33}} = f(Re_e)$ и $\frac{Sh}{Sc^{0,33}} = f(Re_e)$. Несмотря на различную природу теплообменных и массообменных процессов, которая оценивается числами Прандтля и Шмидта, экспериментально определенные комплексы $\frac{Nu}{Pr^{0,33}}$ и $\frac{Sh}{Sc^{0,33}}$ совпадают между собой для одинаковых чисел Рейнольдса (каждая точка на рис. 4.18 получена усреднением минимум 3-х экспериментов).

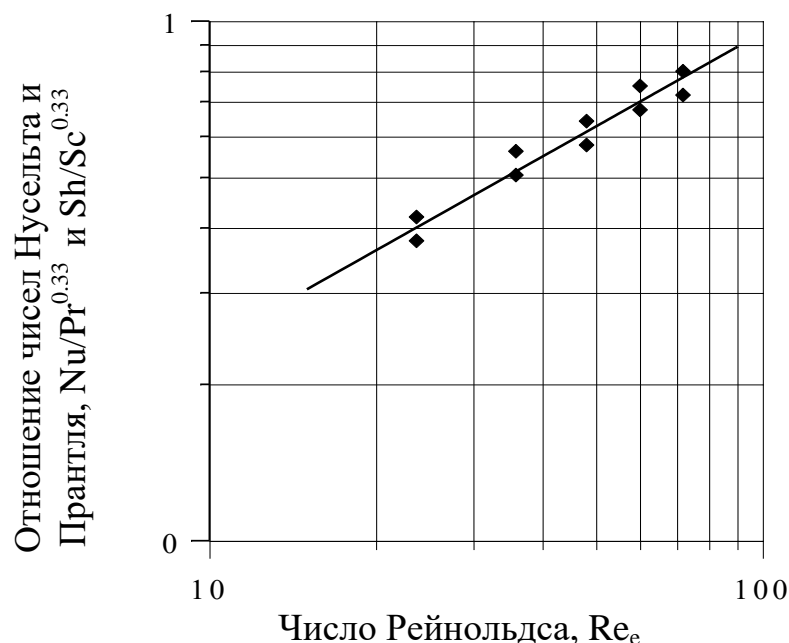


Рисунок 4.18- Обобщение тепло - и массообмена при фильтрационной сушке измельченных стеблей хлопка

Из графической зависимости рис. 4.18 определены неизвестные значения коэффициентов $A=0,061$ и $n=0,65$.

Тогда зависимость (1.17) для измельченных влажных стеблей хлопка будет иметь вид:

$$Nu = 0,061 \cdot Re_e^{0,65} \cdot Pr^{0,33} , \quad (4.36)$$

а зависимость (1.26) соответственно:

$$Sh = 0,061 \cdot Re_e^{0,65} \cdot Sc^{0,33} \quad (4.37)$$

Приведенные зависимости (4.36) и (4.37) позволяют определить коэффициенты теплоотдачи и массоотдачи при фильтрационной сушке в стационарном слое измельченных стеблей хлопка в широких пределах изменения числа Рейнольдса ($10 \leq Re \leq 100$) и прогнозировать затраты тепловой энергии на реализацию процесса фильтрационной сушки и, соответственно, эксплуатационные затраты на этапе проектирования установки фильтрационной сушки. Максимальное значение относительной погрешности между рассчитанными теоретически значениями коэффициентов теплоотдачи и массоотдачи, согласно зависимостей (4.36) и (4.37) соответственно, и рассчитанными на основе экспериментальных данных по зависимости (1.24) и (1.25) не превышает 9 % [145, с.168].

5 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРЕКТИРОВАНИЮ, ЭКСПЛУАТАЦИИ И ВНЕДРЕНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННОЙ СУШИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

5.1 Описание конструкции и принципа работы фильтрационной установки для сушки измельченных стеблей хлопка

Используемое на перерабатывающих заводах сушильное оборудование барабанного типа марки 2СБ-10, СБТ и СБО снижает сортность материала на 25% за счет механического воздействия и очень энергозатратные, [151], а для сушки растительного сырья применяются различные способы и сушильные устройства, которые не приемлемы для сушки измельченных стеблей хлопка. Поэтому внедрение высокоэффективных технологий переработки хлопковых отходов в готовый продукт высокого качества будет конкурентоспособным не только на внутреннем, но и на внешних рынках.

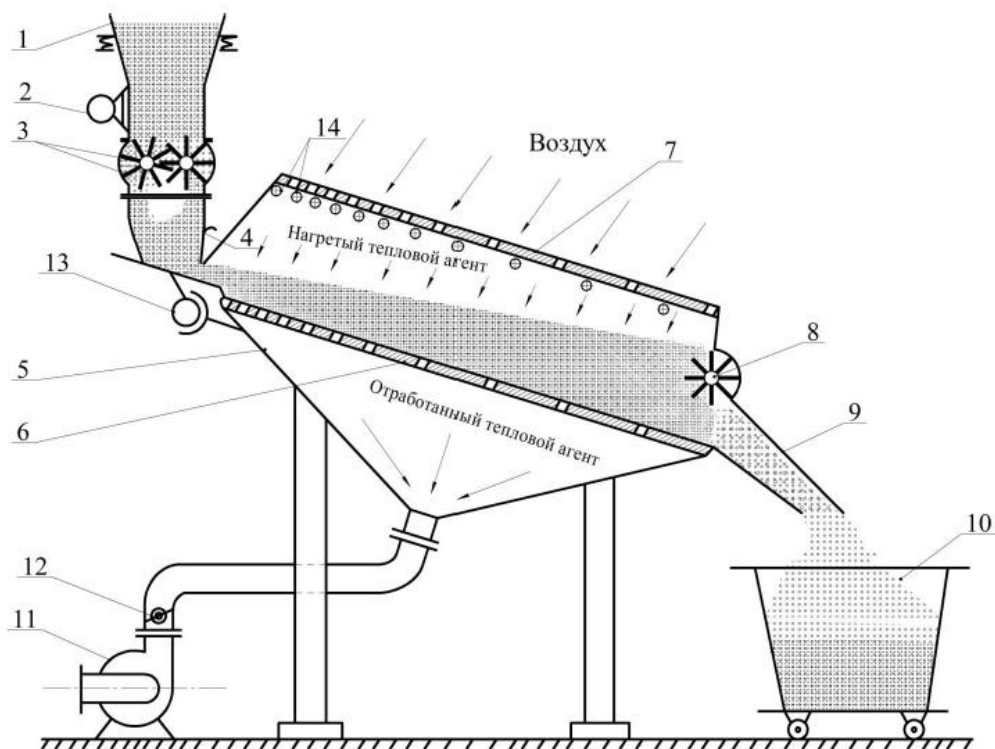
В связи с этим перед нами стояла задача разработать новый тип сушилки, который позволит снизить энергетические затраты на процесс сушки.

Обобщение результатов экспериментальных и теоретических исследований гидродинамики, кинетики и тепло - и массообмена при фильтрационной сушке позволили разработать конструкцию установки для сушки измельченных стеблей хлопка, которая учитывает физико-механические свойства стеблей хлопка [16, с. 5; 152].

Нами предлагается при сушке измельченных древесных отходов сельского хозяйства, каковыми являются стебли хлопка, использование фильтрационной сушильной установки (рисунок 5.1).

Установка фильтрационной сушки измельченных материалов (рисунок 5.1) состоит из бункера 1, который оснащен вибратором 2, дозатором 3 и шибером 4 для регулирования скорости подачи влажного материала. Зона сушки материала состоит из камеры разрежения 5, над которой неподвижно установлены перфорированные пластины 6 по которому перемещается материал и камеры сушки закрытой крышкой 7. В нижней части сушильной камеры установлен дозатор 8 для регулирования скорости выгрузки высушиваемого материала и разгрузочный патрубок 9. На рисунке также изображены вагонетки 10. Камера разрежения 5 соединена с вакуум насосом 11 для отвода отработанного теплового агента, расход теплового агента регулируется с помощью шибера 12. Транспортное средство снабжено механизмом регулирования 13 угла наклона. В камере разрежения установлены система распределения теплоносителя 14.

Устройство отличается новой конструкцией пластины и крышкой камеры сушки с дифференциальной перфорацией с уменьшением живого сечения в направлении движения высушиваемого материала. Система распределения теплоносителя размещена непосредственно в камере сушки расположенной с уменьшающим шагом в направлении движения высушиваемого материала, камера разрежения соединена с вакуум насосом для отсоса отработанного теплового агента [16, с. 6; 152, с.95].



1 - бункер, 2 - вибратор, 3 - дозатор, 4 - шибер, 5 - камера разрезания, 6 - перфорированные пластины, 7 - крышка, 8 - дозатор, 9 - разгрузочный патрубок, 10 - вагонетка, 11 - вакуум насос, 12 – шибер, система нагрева, 13 – механизм регулирования угла наклона, 14- система распределения теплоносителя.

Рисунок 5.1- Установка фильтрационной сушки измельченных стеблей хлопка

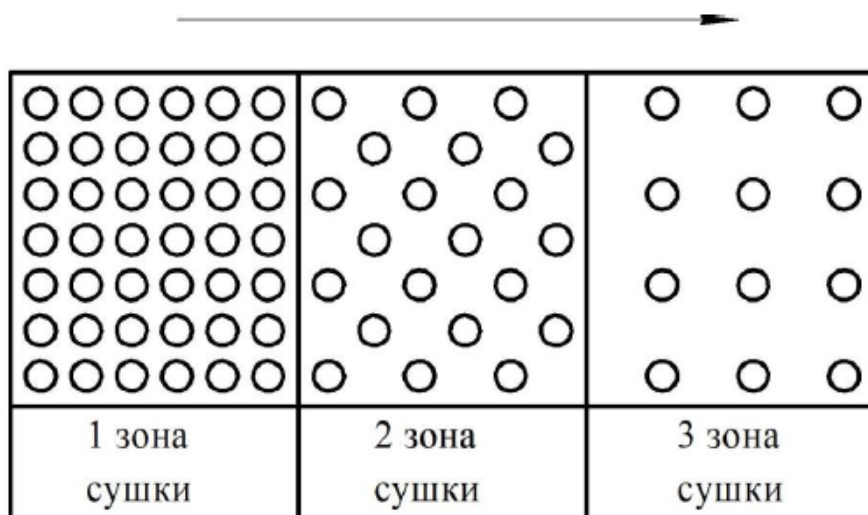


Рисунок 5.2- Вид перфорированной пластины

Установка работает следующим образом. В сушильную камеру с помощью системы распределения теплоносителя 14 подают тепловой агент. Создают разрежение в камере 5. Из бункера 1 с помощью вибратора 2, дозатора 3 и шибера 4 влажный материал поступает на верхнюю часть пластины 6 с

дифференциальной перфорацией (рисунок 5.2) с уменьшением живого сечения в направлении движения высушиваемого материала и перемещается по ней под действием силы тяжести и с помощью дозатора 8 в направлении разгрузочного патрубка 9. Воздух отсасывается с наружи через крышку корпуса 7 камеры сушки нагревается с помощью системы нагрева и распределения теплоносителя 14. За счет созданного разрежения вакуум насосом 11 тепловой агент фильтруется сквозь слой влажного материала, высушивая его. Сухой материал из нижней части перфорированной пластины 6 выгружается с помощью дозатора 8 на вагонетки 10 [16, с. 7; 152, с.96].

Выполнение пластины и крышки корпуса камеры сушки с дифференциальной перфорацией с уменьшением живого сечения в направлении движения высушиваемого материала позволит создать одинаковое гидравлическое сопротивление вдоль всей камеры разрежения и уменьшается материалоемкость установки (рисунок 5.2). Размещение системы распределения теплоносителя непосредственно в камере сушки обеспечивает равномерную сушку, исключая его перегрев, что приведет к уменьшению эксплуатационных затрат и повысит эффективность процесса. Также это позволит исключить затраты на эксплуатацию, изготовление и ремонт пластины. Дозатор, установленный на выходе из сушильной камеры обеспечивает регулировку скорости выгрузки высушенного материала. Все это приведет к увеличению производительности установки [16, с. 8; 152, с.96].

5.2 Рекомендации по проектированию и эксплуатации фильтрационной сушильной установки

Применительно к фильтрационной установке для сушки измельченных стеблей хлопка нами предложены следующие рекомендации.

Скорость теплового агента рекомендуется выбирать в диапазоне: $W_T = 1,5 \div 2,0$ м/с. Этот диапазон является наиболее устойчивым и эффективным.

Температура теплового агента рекомендуется выбирать при фильтрационной сушке измельченных стеблей хлопка в диапазоне равной $40 \div 80$ °С.

Высота стационарного слоя измельченных стеблей хлопчатника, учитывая необходимость обеспечения высокой производительности оборудования и рациональных затрат как тепловой энергии, так и энергии на создание перепада давлений, высота стационарного слоя измельченных стеблей хлопчатника принята равной $H=100$ мм.

Конструктивные параметры. Минимальная высота сушильной зоны фильтрационной установки составляет 0,6м-1м. Ширина сушильной поверхности пластины 0,8-1,2м.

Частоту вращения дозатора подачи измельченных стеблей хлопка фильтрационной сушильной установки рекомендуется выбирать в пределах 0,5-1,5 об/мин, в зависимости от влажности материала и требуемой производительности.

Перфорация поверхности пластины. Для 1 зоны сушки рекомендуется поверхность барабана перфорировать таким образом, чтобы свободное сечение

составляло $S_0 > 0,75 \text{ м}^2/\text{м}^2$, а для 2 зоны сушки $S_0 > 0,5 \text{ м}^2/\text{м}^2$, для 3 зоны сушки $S_0 > 0,25 \text{ м}^2/\text{м}^2$.

Распределительные устройства теплового агента. В фильтрационных сушильных установках тепловой агент подается в сушильную зону с помощью распределительных устройств форсуночного типа, особых требований к распределительным устройствам не предъявляются. Возможно применение различных конструкций распределительных устройств, включая низконапорные.

Материал для изготовления фильтрационной установки выбирается исходя из физико-химических свойств обрабатываемых сред.

5.3 Методика и порядок расчета фильтрационной установки для сушки измельченных стеблей хлопка

Для расчета конструктивных размеров фильтрационной сушильной установки, необходимо:

1. Из справочной технической литературы надо определить все необходимые данные (теплофизические характеристики, мнимую и насыпную плотность и т.п.). Для измельченных стеблей хлопка эти характеристики приведены во 2 главе диссертации (таб. 2.1)

2. Проводят поисковый эксперимент для определения начальной влажности измельченных стеблей хлопка, определяют усредненные размеры частиц, пористость частиц $\varepsilon_{вн}$, пористость слоя $\varepsilon_{ш}$. Для измельченных стеблей хлопка эти характеристики приведены во 2 главе диссертации (таб. 2.2; 2.3)

3. Задаются конечным влагосодержанием высушенного материала в пределах $0,1-0,12 \text{ кг } H_2O/\text{кг сух. м.}$

4. Задаются температурой в пределах $40-80 \text{ }^\circ\text{C}$ и фиктивной скоростью фильтрации теплового агента $0,91-2,17 \text{ м/с.}$

5. Задаются толщиной слоя дисперсного материала в пределах $40 - 120 \text{ мм}$, в зависимости от исходного влагосодержания материала и необходимой производительности.

6. Определяют общее время сушки до конечной влажности, учитывая, что время полного насыщения теплового агента составляет $220-250 \text{ с}$, общее время высушивания измельченных стеблей хлопка до конечной влажности $0,1-0,12 \text{ кг } H_2O/\text{кг сух. м.}$ составляет $450-500 \text{ с}$, а охлаждение – $180-200 \text{ с}$.

$$\tau_3 = \tau_I + \tau_{II} + \tau_{III} \quad (5.1)$$

7. Задаются скоростью движения ленты вдоль зоны сушки и определяют ее длину:

$$L = v_k \cdot \tau_3 \quad (5.2)$$

8. Исходя из необходимой длины зоны сушки, перфорированную поверхность камеры разрежения разбивают на отдельные секции, живое сечение которых будет разным, чтобы суммарные потери давления

«измельченный материал – перфорированная перегородка» вдоль зоны сушки были одинаковыми, что обеспечит постоянную скорость фильтрации.

9. Кроме рассчитанной длины зоны сушки, в сушильной установке необходимо предусмотреть зону загрузки влажного материала $L_{зав.}$ и зону выгрузки сухого материала.

10. Рассчитывают необходимую общую длину сушильной зоны и определяют габариты ленточной установки фильтрационной сушки:

$$L_{заг.} = L + L_{зав.} + L_{выг.} \quad (5.3)$$

11. На основе кинетической кривой фильтрационной сушки строят графическую зависимость $w^c = f(L)$ и определяют изменение влажности вдоль зоны сушки, а также среднюю влажность на каждом секторе.

12. Рассчитывают средние потери давления в слое измельченных стеблей хлопка по расчетной зависимости (3.5) приведенной в третьей главе.

13. Рассчитывают необходимые потери давления в перфорированной перегородке в каждом секторе вдоль зоны сушки, таким образом, чтобы суммарные потери "слой измельченного материала - перфорированная перегородка" были постоянными.

$$\Delta P_{сум.} = \Delta P_{в.ш.} + \Delta P_{пер.пер.} = const \quad (5.4)$$

14. Рассчитывают живое сечение перфорированной перегородки каждого сектора вдоль зоны сушки по расчетной зависимости:

$$S = 1,76 \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P_{пер.пер.}}{10^4 \cdot \rho \cdot v^2}} \quad (5.5)$$

В первой зоне сушки влажных измельченных стеблей хлопка потери давления в перфорированной перегородке должны быть минимальными, поэтому согласно рекомендациям, приведенным в технической литературе, живое сечение должно быть $S_0 > 0,75 \text{ м}^2/\text{м}^2$.

15. Из конструктивных соображений (с точки зрения удобства обслуживания сушильной зоны) задаются шириной ленты "А", в нашем случае 0,8-1,2м.

16. Определяют производительность сушильной установки:

$$G = H \cdot A \cdot v_k \cdot \rho_{нас.}, \left[\frac{\text{кг}}{\text{с}} \right] \quad (5.6)$$

17. Определяют расход теплового агента:

$$Q = L_{заг.} \cdot A \cdot v_0, \left[\frac{\text{м}^3}{\text{с}} \right] \quad (5.7)$$

18. На основе рассчитанных $\Delta P_{\text{сум}}$ и Q , выбирают тип вентилятора и частоту вращения его колеса для создания в сушилке необходимого разрежения.

19. Определяют коэффициент теплоотдачи сухих стеблей хлопка хлопка по уравнению (4.35).

20. Определяют коэффициент теплоотдачи влажных стеблей хлопка по уравнению (4.36).

21. Определяют коэффициент массоотдачи влажных стеблей хлопка по уравнению (4.37)

5.4 Промышленные испытания и внедрение фильтрационной сушильной установки

Как отмечалось выше, для переработки стеблей хлопка с целью получения различных материалов существуют многообразные технологии [154]. Однако, по имеющейся на сегодняшний день технологиям переработки невозможно получить качественные материалы на основе стеблей хлопчатника.

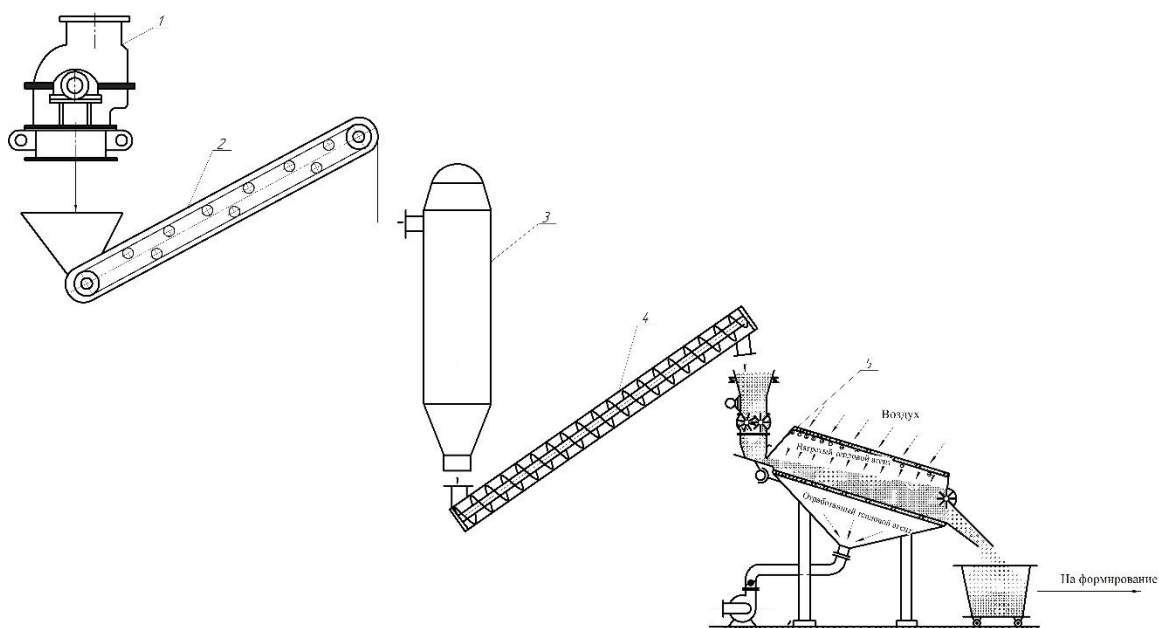
В Мактааральском районе в 2012 году в рамках Программы «Форсированного индустриально-инновационного развития» запустили завод по производству древесно-стружечных плит.

Технологическая линия производства композитных древесно-стружечных плит из стеблей хлопка и полимерных связующих показана на рисунке 5.2.

Технологический процесс состоит из следующих операции: измельчения, просеивание, промывка, пропаривание и осмоление, сушка, кондиционирование, формирование, подпрессовка, прессование, обрезка краев, охлаждение, складирование, шлифовка, обрезка по размерам и упаковка. Кроме указанных основных операции, в цеху для транспортировки сырья и материалов используются подъемники, ленточные и шнековые транспортеры, пневматические транспортеры и различные емкости, бункера с дозаторами, средства пожаротушения.

Описание технологической схемы процесса производства древесно-стружечных плит из стеблей хлопка и полимерных связующих заключается в следующем: с помощью подъемника спрессованные стебли хлопка подаются на ленточный транспортер, ленточный транспортер стебли хлопка подает на измельчитель, после измельчения стружки винтовым шнеком подаются в отсек с ножами, там стружки сортируются по фракционному составу. Сортированная на фракции стружки пневмотранспортом направляются в бункер с дозатором, там стружки обрабатываются связующим полимером из емкости. Обработанные полимерным связующим стружки просушиваются в сушильной установке до необходимой технологической влажности. После сушки смесь подается в емкость и перемешивается в смесителе типа ДСМ-12, смешанная смесь подается на формовочную машину в которой происходит формование древесно-стружечных плит из стеблей хлопка и полимерных связующих. Прессование и получения плит выполняется на гидравлическом прессе.

Прессованные древесно-стружечные плиты на основе стеблей хлопка и полимерных связующих охлаждаются на веерном охладителе (рисунок 5.2).



1-дробилка; 2-транспортер; 3- выпарной аппарат; 4- шнековый транспортер; 5- фильтрационная сушильная установка.

Рисунок 5.1-Принципиальная технологическая линия производства композитных древесных плит из стеблей хлопка и полимерных связующих

До внедрения высушивание влажного сырья осуществляли во вращающихся сушильных барабанах, характеризующихся громоздкостью и низкой эффективностью сушки. В связи с этим, полученные результаты диссертационной работы прошли опытно-промышленные испытания в производстве древесно-стружечных композиционных плит из стеблей хлопчатника и полимерных композиционных связующих на производственной базе в ТОО «Хлопкоперерабатывающий завод Мырзакент» в Туркестанской области (Приложение Г).

В реконструируемой схеме вращающийся сушильный барабан был заменен на фильтрационную сушильную установку.

Установка работает следующим образом. В сушильную камеру с помощью системы распределения теплоносителя подают тепловой агент с начальной температурой $t_n = 80 \text{ }^\circ\text{C}$. Создают разрежение в камере до 10^5 Па . Из приемного бункера с помощью вибратора влажные измельченные частицы стеблей хлопка с начальным влажностью $0,45-0,5 \text{ кг H}_2\text{O/кг сух.мат.}$ поступает на верхнюю часть пластины с дифференциальной перфорацией (рисунок 5.2) с уменьшением живого сечения с $S_0 > 0,75 \text{ м}^2/\text{м}^2$ до $S_0 > 0,25 \text{ м}^2/\text{м}^2$ в направлении движения высушиваемого материала и перемещается по ней под действием силы тяжести и с помощью дозатора в направлении разгрузочного патрубка. Воздух отсасывается с наружи через крышку корпуса камеры сушки нагревается с помощью системы нагрева и распределителя теплоносителя. За счет созданного разрежения вакуум насосом тепловой агент фильтруется сквозь

слой измельченных стеблей хлопка, высушивая его. Сухие измельченные стебли хлопка из нижней части перфорированной пластины высушенные до конечного влагосодержания 0,1-0,12 кг H₂O/кг сух.мат.выгружается с помощью дозатора на вагонетки.

Во время испытаний реконструированной технологической схемы, проведенных совместно сотрудниками ЮКУ им. М.Ауэзова и ТОО «Хлопкоперерабатывающий завод Мырзакент» (приложение Г), учитывая тот факт, что для большинства сушильных установок эксплуатационные затраты составляют около 90%, а капитальные только 10% [153], сравнивали экономическую эффективность процесса сушки измельченных стеблей хлопка в установке фильтрационного типа и во вращающемся сушильном барабане при одинаковой производительности по готовому продукту (1000 кг/ч), как наиболее затратной стадии в себестоимости перерабатываемых материалов.

Необходимо заметить, что фильтрационная сушка является низкотемпературной и соответственно потери теплоты в окружающую среду будут значительно меньше, чем в случае использования сушильных вращающихся барабанов. При испытаниях диапазоны изменения основных параметров процесса при сушке измельченных стеблей хлопка показали, что:

- начальная и конечная температура высушиваемого материала, соответственно:

барабанная сушилка - $T_n = 165^{\circ}C$, $T_k = 100^{\circ}C$.

фильтрационная сушилка- $T_n = 75^{\circ}C$, $T_k = 35^{\circ}C$.

- начальная и конечная температура теплового агента, соответственно:

-барабанная сушилка $t_n = 300^{\circ}C$, $t_k = 100^{\circ}C$.

-фильтрационная сушилка $t_n = 80^{\circ}C$, $t_k = 40^{\circ}C$.

Суммарное количество затрат энергии необходимое для сушки измельченных стеблей влажного хлопка сравнительно для барабанной сушилки и фильтрационной сушильной установки составили:

-барабанная сушилка-2657,1 кВт;

-фильтрационная сушилка-953 кВт.

Технико-экономический расчет затрат энергии на процесс фильтрационной сушки осуществляли по приведенной в [105, с.194] методике. Результаты расчета приведены в приложении Г.

Надо отметить, что все стадии процесса фильтрационной сушки при этом прошли удовлетворительно. Фильтрационная установка для сушки измельченных стеблей хлопка показала свою высокую эффективность сушки (Приложение Г). Измельченные стебли хлопка имели удовлетворительную сыпучесть, фракции древесной и волокнистых частей практически не отличались по геометрическим формам и размерам. При транспортировке в фильтрационную сушильную установку, смесь шла равномерным слоем и загорания в сушильной камере не наблюдалось, благодаря правильно установленному режиму сушки и низкой температуре сушильного агента.

Опытно-промышленные испытания проведены на основе разработанных научно-методических рекомендации по проектированию фильтрационной сушильной установки и научно обоснованной методики расчета.

Вместе с тем, проведенные нами промышленные испытания показали возможность использования разработанной конструкции фильтрационной установки для сушки стеблей хлопка в производстве композитных древесно-стружечных плит из стеблей хлопчатника с полимерными связующими на модернизированной технологической схеме ТОО «Хлопкоперерабатывающий завод Мырзакент». Также можно констатировать, что полученные результаты физико-механических свойств стеблей хлопчатника свидетельствуют о возможности использования рекомендации по проектированию фильтрационной сушильной установки и научно обоснованной методики расчета в промышленном производстве. При этом применение фильтрационного метода обезвоживания измельченных стеблей хлопка позволило уменьшить энергозатраты на процесс сушки в 2,7 раза по сравнению с барабанной сушилкой.

Кроме того, результаты НИР по созданию фильтрационной сушильной установки и методики расчета внедрены в учебный процесс для проведения лекционных и практических занятий по дисциплине «Оборудование для сушки твердых материалов» в раздел «Сушка древесины» и по дисциплине «Процессы и аппараты химической технологии» в разделе «Сушка. Способы тепловой сушки» (Приложения Б, В).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Краткие выводы по результатам диссертационных исследований.

1. На основе обзора конструкций сушильных аппаратов обоснован выбор объекта исследований – фильтрационной сушильной установки для проведения процесса сушки измельченных стеблей хлопка. Сформулированы задачи для проведения исследований и создания научно-обоснованных методов расчета.

2. Экспериментальным путем изучены основные физико-химические характеристики измельченных стеблей хлопка, такие как гранулометрический-фракционный состав, пористость, насыпная и истинная плотность, установлены гометрические формы измельченных стеблей хлопка, которые состоят из частиц призматических и цилиндрических форм, рассчитаны усредненный объем и внешняя поверхность частиц.

3. Экспериментально исследовано гидравлическое сопротивление неподвижного слоя измельченных стеблей хлопка при фильтрации газового потока и на основе полученных данных определены опытные коэффициенты модифицированного уравнения Эргуна. На основе обобщения экспериментальных данных получена критериальная расчетная зависимость числа Эйлера от числа Рейнольдса.

4. Проведены исследования закономерностей кинетики фильтрационной сушки измельченных стеблей хлопка и установлены периоды полного и частичного насыщения теплового агента, получены зависимости для расчета изменения влагосодержания во времени, времени достижения критической влажности и времени сушки в периодах частичного насыщения теплового агента.

5. Проведены исследования теплообменных характеристик при фильтрации теплового агента через слой измельченных стеблей хлопка и получены уравнения для определения коэффициента теплоотдачи в зависимости от скорости движения теплового агента через сухой слой и коэффициентов тепло- и массоотдачи через влажный слой измельченных стеблей хлопка.

7. Результаты исследований, полученные расчетные зависимости по гидродинамике, кинетике и теплообмену положены в основу методики и порядка расчета фильтрационной сушильной установки.

8. На основе разработанных рекомендации по эксплуатации и проектированию промышленный образец фильтрационной сушильной установки внедрен на ТОО «Хлопкоперерабатывающий завод Мырзакент» в отделение изготовления древесно-стружечных плит для сушки измельченных стеблей хлопка. При этом применение фильтрационного метода обезвоживания измельченных стеблей хлопка позволило уменьшить энергозатраты на процесс сушки в 2,7 раза по сравнению с барабанной сушилкой.

Оценка полноты решений поставленных задач. Результаты теоретических исследований, экспериментальное изучение закономерностей фильтрационной сушки, гидродинамики, кинетики и процессов

тепломассообмена, промышленная апробация полностью соответствуют поставленным в диссертации задачам.

Разработка рекомендаций и исходных данных по конкретному использованию результатов. Результаты по изучению гидродинамики, кинетики и процессов теплообмена в фильтрационной сушильной установке, разработанные методика и порядок расчета, рекомендации по эксплуатации и проектированию фильтрационной сушильной установки могут быть использованы в высших и средних технических учебных заведениях в учебном процессе, в научно-исследовательских и проектных организациях, инженерно-техническими и научными работниками перерабатывающих отраслей промышленности при усовершенствовании и модернизации промышленных установок.

Исходными данными по конкретному использованию результатов являются физико-химические свойства высушиваемого материала –стеблей хлопка, методики расчета основных гидродинамических характеристик, кинетики и параметров теплообмена, а также рекомендации по проектированию и эксплуатации сушильного оборудования, включающих выбор температуры, скорости теплового агента и высоты слоя измельченных стеблей хлопка.

Оценка технико-экономической эффективности внедрения. По результатам проведенных исследований разработана конструкция промышленной фильтрационной сушильной установки, которая внедрена на ТОО «Хлопкоперерабатывающий завод Мырзакент» в отделение изготовления древесно-стружечных плит для сушки измельченных стеблей хлопка. При этом применение фильтрационного метода обезвоживания измельченных стеблей хлопка позволило уменьшить энергозатраты на процесс сушки в 2,7 раза по сравнению с барабанной сушилкой.

Оценка научного уровня выполненной работы в сравнении с лучшими достижениями в данной области. Анализ технико-экономических показателей разработанной и исследованной фильтрационной сушильной установки показывает, что по ряду показателей, таких как энергетические показатели, материалоемкость, эффективность проведения процессов теплообмена, предлагаемая сушильная установка стоит в одном ряду с современными конструкциями сушильных установок и превосходит их по такому показателю как низкая энергопотребляемость.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Hamawand I., Sandell G., Pittaway P., Chakrabarty S., Yusaf T., Chen G., et al. Bioenergy from cotton industry wastes: A review and potential// Renewable and Sustainable Energy Reviews.- 2016.- Vol.66.-P. 435-448.
- 2 Rafat A., Christoph P., Tobias P. Bioenergy Recovery from Cotton Stalk// In book: Cotton Research Publisher.-2019.-20p. doi: 10.5772/intechopen.88005.
- 3 Reddy N., Yang Y. Fibers from Cotton Stalks // Innovative Biofibers from Renewable Resources.- Berlin: Springer-Heidelberg, 2015 –P.13-14. https://doi.org/10.1007/978-3-662-45136-6_5.
- 4 Государственная программа индустриально-инновационного развития Республики Казахстан на 2020 - 2025 годы: утверждена Постановлением Правительства Республики Казахстан 31 декабря, 2019, № 1050// https://online.zakon.kz/Document/doc_id=32424143.
- 5 Ажиметова Г.Н. Мировой опыт и обзор развития хлопководства в Казахстане // Современные проблемы науки и образования.-2011.-С. 53-58.
- 6 Негматов С. С., Холмуродова Д. К., Абед Н. С., Негматова К. С., Бойдадаев М. Б., Туляганова В. С. Разработка эффективных составов композиционных древесно-пластиковых плитных материалов на основе местного сырья и отходов производств //Сырьё и вспомогательные материалы. ПластическиеМассы.-2020. -№11(12).-С.28–32.
- 7 Zhou L.C., Shi Q. C., Liu Y. E., Jiang C. and Xu X. -W. Pyrolysis Characteristics and Kinetics Of Cotton Stalk// 2009 International Conference on Energy and Environment Technology.- 2009.- P. 768-772, doi: 10.1109/ICEET.2009.192.
- 8 Yang Ying, Zhang Yanlin, Zheng Wenxuan, Yuan Qiaoxia. Optimizing Technological Parameters of Cotton Stalk and Pyrolysis Products //Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery.-2013.-Vol.44(12).-P.160-163.
- 9 Sahib Ullah, Syed Bilal Ahmed Zaidi, Akhlaq Aman. Evaluating the Properties of Bio-oil Modified Bitumen Derived from Cotton Stalk Waste // Advances in Social Science, Education and Humanities Research Published by Atlantis: Press SARL. -2021.-Vol. 529. - P.599-606
- 10 Лыков А. В. Теория сушки. Изд. 2-е, пер. –М.: Энергия,1968.-472с.
- 11 Сажин. Б. С. Основы техники сушки.- М.:Химия, 1984.-320с.
- 12 Лурье М.Ю. Сушильное дело. Изд. 2-е, пер. и доп.-М.:ГОНТИР «Энергетическая литература»,1938.-385с.
- 13 Mujumdar, Arun S. Handbook of Industrial Drying Fourth Edition.- New York:LLC CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, an Informa business, 2015.-1334p.
- 14 Kobeyeva Z.S., Khussanov A.Ye., Atamanyuk V.M., Khussanov Zh.Ye. Determination of Physico-Chemical characteristics of crushed Cotton Stalks for further Processing // Reports of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. -2021.-Vol. 6, Nu. 340.-P. 106-113. //doi.org/10.32014/2021.2518-1483.117.

15 Kobeyeva Z., Khussanov A., Atamanyuk V., Hnativ Z., Kaldybayeva B., Janabayev D. Research of hydrodynamics of gas flow filtration through a stationary layer of crushed cotton stalks (wild cotton)// *Technology Audit and Production Reserves.*- 2021. - Vol.5 (61).-P. 46–51. doi:10.15587/ 2706-5448.2021.240250.

16 Хусанов А.Е., Калдыбаева Б.М., Атаманюк В.М., Кобеева З.С., Хусанов Ж. Е., Сабырханов М.Д. Установка фильтрационной сушки сыпучих материалов// Патент на полезную модель РК № 6241 от 19.03.2021 г.-10 с.

17 Курдюмова В.М. Материалы и конструкции из отходов растительного сырья. –Фрунзе: Киргизистан, 1990г. -111 с.

18 Раббимов Р.Т., Узаков Г.Н., Хайитов Р.М., Сафаров И.Э., Халикова Х.А. Исследование физико-химических и теплотехнических свойств различных древесных и растительных отходов для получения альтернативных моторных топлив // *Технические науки в России и за рубежом: материалы междунар. заоч. науч. конф. / Под общ. ред. Г.Д. Ахметовой.* – М.: Ваш полиграфический партнер, 2011. –С. 68-72

19 Saidur R., Abdelaziz E. A., Demirbas A., Hossain M. S. and Mekhilef S. "A Review on Biomass as a Fuel for Boilers // *Renewable and Sustainable Energy Reviews.*-2011. - Vol.15(5).- P.2262-2289. doi:10.1016/j.rser.2011.02.015.

20 Babu B. V. Biomass Pyrolysis: A State-of-the-Art Review // *Biofuels, Bioproducts and Biorefining.*- 2008.- Vol.2 (5).-P. 393-414. doi:10.1002/bbb.92.

21 Kung C.C., Zhang N. Renewable energy from pyrolysis using crops and agricultural residuals: An economic and environmental evaluation // *Energy.* -2015.- Vol.90 (2).-P.1532-1544.

22 Mohan D., Pittman C., Steele P. Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: A critical review// *Energy.*- 2006.- Vol.20.-P.848-852. doi: 10.1021/ef0502397.

23 Bridgwater A.V. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading // *Biomass and Bioenergy.*- 2012.- Vol.38.- P.68-94.

24 Qi Z., Jie C., Teijun W., Ying X. Review of biomass pyrolysis oil properties and upgrading research // *Energy Conversion and Management.*- 2007. -Vol.48. – P.87-92.

25 Chen Y., Yang H., Wang X., Zhang S. and Chen H. Biomass-Based Pyrolytic Polygeneration System on Cotton Stalk Pyrolysis: Influence of Temperature // *Bioresource Technology.*- 2012.- Vol.107.-P.411-418. doi:10.1016/j.biortech.2011.10.074.

26 Pütün A. E., Özbay N., Önal E. P. and Pütün E. Fixed-Bed Pyrolysis of Cotton Stalk for Liquid and Solid Products // *Fuel Processing Technology.*- 2005.- Vol.86 (11).-P. 1207-1219. doi:10.1016/j.fuproc.2004.12.006.

27 Gupta A., Thengane S. K. and Mahajani S. Kinetics of Pyrolysis and Gasification of Cotton Stalk in the Central Parts of India // *Fuel.*- 2020. - Vol.263. doi:10.1016/j.fuel.2019.116752.

28 Fawzy S ., Osman A.I., Farrell C., et al. Characterization and kinetic modeling for pyrolytic conversion of cotton stalks // *Energy Sci Eng.* -2021.- Vol.9. – P.1908–1918. <https://doi.org/10.1002/ese3.961>.

29 Guler C., Ozen R. Some properties of particleboards made from cotton stalks (*Gossypium hirsutum* L.) // *European Journal of Wood and Wood Products*. -2004.- Vol. 62.- P.40–43. doi 10.1007/s00107-003-0439-9.

30 Gencer A., Eroglu H., Ozen R. Medium density fibreboard manufacturing from cotton stalks // *Inpaper International, A publication on Wood Pulp and Paper Industry*. -2001.- Vol. 5(2).-P.26–28.

31 Gagandeep K.S. and Sandhya S. Engineering properties of cotton stalks (*Gossypium hirsutum* L.) // *Indian J. Agric. Res.*- 2015.- Vol.49 (5).-P. 456-459. doi: 10.18805/ijare.v49i5.5811.

32 Халикова Х. А., Нурова М. А. Влияние влажности стебли хлопчатника (гуза-пай) и интенсивности теплового потока на скорость пиролиза // *Молодой учёный*.- 2015.-№ 8 (88).-С. 328-333.

33 Silanikove N. and Levanon D. Cotton Straw: Composition, Variability and Effect of Anaerobic Preservation // *Biomass*. -1986.- Vol.9 (2).-P.101-112. doi:10.1016/0144-4565(86)90114-9.

34 Velmourougane K., Manikandan A., Blaise D. and Vellaichamy M. Cotton Stalk Compost as a Substitution to Farmyard Manure Along with Mineral Fertilizers and Microbials Enhanced Bt Cotton Productivity and Fibre Quality in Rainfed Vertisols // *Waste and Biomass Valorization*. -2022.-14p. doi:10.1007/s12649-022-01689-x.

35 Isci A. and Demirer G. N. Biogas Production Potential from Cotton Wastes // *Renewable Energy*. -2007.- Vol.32 (5).-P. 750-757. doi:10.1016/j.renene.2006.03.018.

36 Girgis B. S. and Ishak M. F. Activated Carbon from Cotton Stalks by Impregnation with Phosphoric Acid // *Materials Letters*.- 1999.- Vol.39 (2).- P.107-114. doi:10.1016/S0167-577X(98)00225-0.

37 Abasaheed A. E. Briquetting of Carbonized Cotton Stalk // *Energy*.- 1992.- Vol.17 (9).- P. 877-882. doi:10.1016/0360-5442(92)90105-9.

38 da Silva J. E., de Araújo Melo D. M., de Freitas Melo M. A., de Aguiar E. M., Pimenta A. S., de Medeiros E. P., Calixto G. Q. and Braga R. M. Energetic Characterization and Evaluation of Briquettes Produced from Naturally Colored Cotton Waste // *Environmental Science and Pollution Research*. -2019. -Vol.26 –P. 14259–14265 doi:10.1007/s11356-019-04777-z.

39 Attia A. A., El-Hendawy A. -N A., Khedr S. A. and El-Nabarawy Th. Textural Properties and Adsorption of Dyes Onto Carbons Derived from Cotton Stalks // *Adsorption Science and Technology*.-2004.- Vol. 22 (5).-P. 411-426. doi:10.1260/0263617042863075.

40 Петросян Э.А., Румако Т.К., Стравчинский А.И. Состояние и перспективы производства строительных материалов с использованием растительных отходов в Узбекистане: Обзор. –Ташкент: УзНИИНТИ, 1986. –30 с.

41 Шарифов А. Состав и свойства коррозионностойких цементсодержащих композиций с использованием эффективных химических и минеральных добавок // *Автореф. дисс. ... докт. техн. наук*. –Ташкент, 2004. –51 с.

42 Стравчинский А.И., Румако Т.К. Использование хлопковых отходов и жидкого стекла для изготовления теплоизоляционных плит // Информация о строительных материалах . – Ташкент, УзИНТИ, 1967. -С.3-9.

43 Sun J., Yang H., Cao X., Ma Y., Zhang W. and Sun G. Design of an Intelligent Fuzzy Control System for Biomass Drying Process // *Proceedings 4th International Conference on Control, Automation and Robotics, ICCAR.*- 2018. –P. 166 – 170. doi:10.1109/ICCAR.2018.8384664.

44 Li H., Chen Q., Zhang X., Finney K. N., Sharifi V. N. and Swithenbank J. Evaluation of a Biomass Drying Process using Waste Heat from Process Industries: A Case Study. // *Applied Thermal Engineering.*-2012.- Vol.35(1).-P.71-80. doi:10.1016/j.applthermaleng. 2011.10.009.

45 Delele M. A., Weigler F. and Mellmann J. Advances in the Application of a Rotary Dryer for Drying of Agricultural Products: A Review // *Drying Technology.*-2015. - Vol.33 (5).-P. 541-558. doi:10.1080/07373937.2014.958498.

46 Mujumdar A. S. and Law C. L. Drying Technology: Trends and Applications in Postharvest Processing // *Food and Bioprocess Technology.*-2010. - Vol.3 (6).-P. 843-852. doi:10.1007/s11947-010-0353-1.

47 Hu G., Zhang S., Wang X., Shao J., Yang Q. and Chen H. Influence of Microwave Pretreatment on Drying Characteristics and Physicochemical Properties of Biomass // *Taiyangneng Xuebao/Acta Energetica Solaris Sinica.*-2017.- Vol.38 (10). P. 2693-2697.

48 Wang H., Li P., Jiang W. and Guo K. Modeling and Analysis of Extruded Cotton Stalks in Microwave-Vacuum Drying // *Zhenkong Kexue Yu Jishu Xuebao/Journal of Vacuum Science and Technology.*-2016.- Vol.36 (4).-P. 425-431. doi:10.13922/j.cnki.cjovst.2016.04.09.

49 Pupinis G. Grain drying by use of changeable airflow method // *Agronomy Research.* – 2008. – № 6 (1). – P. 55–65.

50 Шандиба Н. О., Юхименко М. П Структурний аналіз втрат в технологічних процесах переробки сільськогосподарської продукції // Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини : збірник тез доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції. –2011. – С. 101–102.

51 Дубковецький І.В., Малезик І.Ф., Євчук Я.В. Дослідження біологічно активних речовин при конвективному, кондуктивному і мікрохвильовому зневодненні сортів глоду // Наукові праці ОНАХТ. – 2012. – Вип. 41., Т. 1 – С. 87–92.

52 Zhang M., Jiang H., Lim R. Recent Developments in Microwave-Assisted Drying of Vegetables, Fruits, and Aquatic Products – Drying Kinetics and Quality Considerations // *Drying Technology.*– 2010 – Vol. 28.– P.1307–1316.

53 Черевко О. І., Єфремов Ю. І., Михайлов В. М. Переробка дикорослої та пряно-ароматичної рослинної сировини// ХДУХТ.- 2007. – 229с.

54 Потапов В.О., Єфремов Ю. І., Михайлова С.В. Дослідження процесів вакуумного мікрохвильового концентрування та сушіння пряної сировини //

Восточно-Европейский журнал передовых технологий. - 2014. - № 1(10). - С. 36-40.

55 Ratti C. Hot air and freeze-drying of high-value foods: a review // Journal of Food Engineering. - 2001.-Vol.49 (4). - P. 311-319.

56 McDonald K., Da-Wen S. Vacuum cooling technology for the food processing industry: a review // Journal of Food Engineering.- 2000.- Vol. 45(2). –P. 55- 65.

57 Малежик І. Ф., Бессараб О.С., Бандуренко Г.М., Левківська Т.М. Дослідження процесу НВЧ-сушіння морквяних вичавок при одержанні каротиновмісного збагачувача // Національний університет харчових технологій. - Київ, 2014. -Том 45(2).- С. 51-55.

58 Wang R., Zhang M., Mujumdar A.S., Sun J.C. Effect of food ingredient on microwave freeze drying of instant vegetable soup // LWT – Food Science and Technology.– 2010.– № 43 (7).-P. 1144–1150.

59 Wang H., Guo K., Li P. and Lin Y. Microwave Drying Kinetics and Energy Consumption Analysis of Extruded Cotton Stalks //Nongye Gongcheng Xuebao:Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering.-2015. - Vol.31 (19).-P. 294-301. doi:10.11975/j.issn.1002-6819.2015.19.040.

60 Chen D., Li M. and Zhu X. TG-DSC Method Applied to Drying Characteristics and Heat Requirement of Cotton Stalk during Drying // Heat and Mass Transfer/Waerme- Und Stoffuebertragung.-2012.- Vol.48 (12).-P.2087-2094. doi:10.1007/s00231-012-1050-6.

61 Кіндзера Д.П., Ханік Я.М., Атаманюк В.М. Сушіння у щільному шарі як метод інтенсифікації і енергозбереження // Міжнародна науково – технічна конференція “Енергоефективність – 2002”.-Київ,2002.- С. 93-96.

62 Кіндзера Д.П., Ханік Я.М., Атаманюк В.М. Фільтраційне сушіння – як метод захисту навколишнього середовища // Сб. науч. трудов межд. научно-техн. конф. «Современные проблемы химической технологи неорганических веществ». –Одесса,2001. -Т.2. –С.57-61. +

63 Ханік Я.Н. Фильтрационная сушка плоских проницаемых материалов //Дисс. ... докт. техн. наук. – Львов, 1992. –401 с.

64 Атаманюк В. М., Ходорівський Р. В., Барна І. Р. Гідравлічні закономірності роботи апаратів із стаціонарним шаром дисперсного матеріалу // Вісник Нац. ун-т «Львів. політехніка». Хімія, технологія речовин та їх застосування. зб. наук. пр.- Львів, 2010. -№ 667. – С. 253-258.

65 Гузьова І.О. Гідродинаміка і тепломасообмін під час фільтраційного сушіння матеріалів кристалічної та аморфної структури //Дисс.... канд. техн. наук.- Львів, 2002.-132с.

66 Атаманюк В.М., Гумницький Я.М. Наукові основи фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів. - Львів: Видавництво Національного університету “Львівська політехніка”, 2013.-276с.

67 Ханік Я.М., Гузьова І.О., Атаманюк В.М. Особливості гідродинаміки та кінетики фільтраційного сушіння дисперсної кавової сировини // Науковий

вісник УкрДЛТУ: Збірник наук.-техн. праць. – Львів, 2000. –Вип.10.2. – С.159-161.

68 Кіндзера Д.П., Ханик Я.М., Атаманюк В.М. Гідродинаміка фільтраційного сушіння торфу // Вісник ДУ «Львівська політехніка», Хімія, технологія речовин та їх застосування. –Львів,2001. –№426. – С.204-208.

69 Склабинский В.И., Ляпощенко А.А., Логвин А.В. Гидродинамические особенности движение двухфазных потоков в инерционно-фильтрующих сепараторах // Вісник сумського державного університету. Серія Технічні науки. – 2009. – №1. – С.79-83.

70 Кіндзера Д.П., Ханик Я.М., Атаманюк В.М. Зернистий матеріал. Гідродинаміка полідисперсного шару // Хімічна промисловість України. – Киев,2002. – №6. – С.38-42.

71 Кіндзера Д.П., Ханик Я.М., Атаманюк В.М. Гідродинамічні особливості при сушінні дисперсних матеріалів у щільному шарі // Науковий вісник УкрДЛТУ: Збірник наук.-техн. праць. –Львів,2003. –Вип.13.1. – С.126-133.

72 Гельперин Н.И. Основные процессы и аппараты химической технологии.- М.: Химия, 1981. – 812 с.

73 Аэров М.Э., Тодес О.М. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем. – Л.: Химия, 1968. – 510 с.

74 Мосюк М.І. Гідродинаміка і тепло масообмін під час сушіння подрібненої «енергетичної» верби в стаціонарному шарі// Автореф. дисс. ... кан. техн. наук.– Львів, 2012. – 24с.

75 Симак Д.М. Фільтраційне сушіння дрібнодисперсних залізовмісних матеріалів // Автореф. дисс. ... кан. техн. наук. – Львів, 2012. – 24с.

76 Барна І.Р. Гідродинаміка і тепломасообмін під час фільтраційного сушіння сировинних матеріалів шлакового гравію // Автореф. дисс. ... канд. техн. наук: – Львів, 2013. – 24 с.

77 Матківська І.Я. Механізм і кінетичні закономірності фільтраційного сушіння зерна пшениці// Автореф. дисс. ... кан. техн. наук. – Львів, 2015. – 24с.

78 Атаманюк В.М., Матківська І.Я., Мосюк М.І. Гідродинамічні особливості фільтраційного сушіння зерна пшениці // Збірник наукових праць ОПАХТ. – 2013. – Т.2, Вип.43. – С. 10-16.

79 Демьяненко М.Н., Ляпощенко А.А., Павленко И.В., Склабинский В.И. Решение дифференциальных уравнений Навье-Стокса и задачи гидроупругости для процессов сепарации в криволинейных каналах // Вісник Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна. Серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління». – 2015. – №27. – С. 53-64.

80 Гузьова І.О., Ханик Я.М. Гідродинаміка фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів // Вісник НУ «ЛП» (Хімія, технологія речовин та їх застосування). -2000.-№414.- С. 168-172.

81 Аль-Ашкар Ясер. Фільтраційне сушіння дисперсних матеріалів в щільному шарі при ІЧ-нагріванні // Автореф. дисс. ... кан. техн. наук. – Львів, 1997 – 24 с.

82 Кіндзера Д.П. Сушіння паливних матеріалів різнодисперсного складу у щільному шарі // Дисс.... канд. техн. наук.- Львів, 2003.-125с.

83 Атаманюк В.М., Ходорівський Р.В., Басистий М.М. Гідродинаміка стаціонарного шару гранульованого крупно пористого силікагелю // Науковий вісник НЛТУ України: Збірник наук.-техн. праць. –Львів,2012. – Вип. 22.5. – С.116-121.

84 Fox B. Granulation and drying of delicate products. // Chemical Engineering. – USA, 2005. – Vol.112 (3). – P. 35-38.

85 Arun Mujumdar S. Research and development in drying: recent trends and future prospects // Drying Technology. – 2004. – Vol. 22 (1) – P. 1–26.

86 Wang W., Arun Mujumdar S., Chen G. Physical interpretation of solids drying: an overview on mathematical modeling research // Drying Technology; April. – 2007. – Vol 25(4) – P. 659–668.

87 Dalmaz N., Hilmi Onder O., Nedim Eraslan A., Uludag Y. Heat and mass transfer mechanisms in drying of a suspension droplet: a new computational model // Drying Technology. – 2007. – Vol. 25. - P. 391 – 400.

88 Schmidt M. Conditioning of the moisture content of hygroscopic particles in batch and continuous plants // Teoretyczne i eksperymentalne podstawy budowy aparatury przemysłowej: 6 międzynarodowa konferencja naukowa. – Kraków: Czas. techn. PKrak., 2003. – №5. – P. 419-429.

89 Лыков А.В., Михайлов Ю.А. Теория тепло- и массопереноса.– М.: ГЭИ, 1963. – 353 с.

90 Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.

91 Никитенко Н.И., Снежкин Ю.Ф., Сороковая Н.Н., Кольчик Ю.Н. Молекулярно-радиационная теория и методы расчета тепло- и массообмена.– Киев, 2014. – 743 с.

92 Рудобашта С.П., Дмитриев В.М. Роль гидродинамики потоков в непрерывно действующих сушилках с дисперсной твердой фазой // Современные энергозберегающие тепловые технологии (сушка и тепловые процессы): II Междунар. научно-практическая конференция: тезисы докл. – М., 2005. – Т. 1. – С. 51-58.

93 Склабинский В.И., Аль Хайят Мохаммед Н.К. Вихревые противоточные массообменные аппараты. Интенсификация массообмена // Хімічна промисловість України. – 2010.– № 6.– С. 11-14.

94 Рудобашта С.П. Математическое моделирование процесса сушки дисперсных материалов // Инженерно-физический журнал. – 2010. – Т. 83, № 4. – С. 705-714.

95 Рудобашта С.П. Расчет кинетики сушки дисперсных материалов на основе аналитических методов // Энергетика: Известия Академии наук. – 2000. – №4. – С. 98-109.

96 Матківська І.Я., Симак Д.М., Атаманюк В.М. Тепломасообмін під час фільтраційного сушіння зерна пшениці // Хімічна промисловість України. – 2013. – №2. – С. 55-59.

97 Атаманюк В.М., Кіндзера Д.П., Гузьова І.О. Теплообмін в стаціонарному шарі сухого дрібнодисперсного капілярно-пористого матеріалу // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — Харків, 2010. — Т.3/7, № 45.-С. 21-35.

98 Барна І.Р., Атаманюк В.М., Свішевська А.В., Філіпович І.В. Математичне моделювання внутрішньодифузійного масоперенесення під час сушіння одинарної сирцевої гранули шлакового гравію // XIV Міжнародна наукова конференція «Львівські хімічні читання — 2013»: тези доповідей. — Л., 2013. — С. 36-39.

99 Matkivska I., Gumnytskyi Y., Atamanyuk V. Kinetics of diffusion mass transfer during filtration drying of grain materials // Chemistry & Chemical Technology. – 2014. – Vol. 8, No. 3. – P.359-363.

100 Атаманюк В.М., Мальований М.С., Дулеба В.П. Теплообмін під час фільтраційного сушіння осадженого і гранульованого поліакриламідну // Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України. Збірник наукових праць. –Львів, 2010. — Вип. 20.6. — С.113-121.

101 Барна І.Р., Атаманюк В.М., Матківська І.Я. Тепломасообмін під час фільтраційного сушіння сирцевих гранул шлакового гравію // Вісник НТУ «ХП». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Хімія, хімічна технологія та екологія. — 2012.— № 17. — С. 146-152.

102 Лыков М.В. Сушка в химической промышленности.-М.: Химия, 1970. – 428с.

103 Кіндзера Д.П., Атаманюк В.М., Микичак Б.М., Уткіна О.В. Моделювання тепло-масообмінних процесів під час фільтраційного сушіння струганого березового шпону // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Хімія, технологія речовин та їх застосування. - 2014. - № 787. - С. 319-323.

104 Мосюк М.І., Атаманюк В.М., Кіндзера Д.П. Гідродинаміка стаціонарного шару подрібненої «енергетичної» верби під час фільтраційного сушіння // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. - 2011. — Вип. 40. -Т. 1. — С. 197-202.

105 Biley P., Mykychak B., Kindzera D. External heat-and-mass transfer during drying of packed birch peeled veneer // Chemistry and Chemical Technology. –2013. – Vol. 7 (2). – P. 191–195.

106 Римар Т.І. Сушіння глини у нерухомому шарі // Автореф. дисс. ... кан. техн. наук. – Львів, 2008 – 19 с.

107 Гузьова І.О., Кебало Г.В., Крамар Х.А. Кінетика фільтраційного сушіння фосфогіпсу // Вісник НУ "Львівська політехніка", Хімія, технологія речовин та їх застосування.- 2014. -№787.- С.305 – 309.

- 108 Атаманюк В.М., Барна І.Р. Кінетика фільтраційного сушіння шлаку теплових електростанцій // Збірник наукових праць ОНАХТ. — 2012. — Т.2, Вип.41. — С. 89-93.
- 109 Білей П.В., Соколовський І.А. Основи кінетики процесу сушіння // Науковий вісник НЛТУ України. - 2014. - Вип. 24.5. - С. 142-146.
- 110 Гузьова І.О., Караман В.П., Грибович А.С. Кінетика фільтраційного сушіння амофосу // Вісник НУ "Львівська політехніка", Хімія, технологія речовин та їх застосування. -2013. -№761. -С. 233 – 240.
- 111 Атаманюк В.М., Барна І.Р., Симак Д.М. Кінетика фільтраційного сушіння сировинних матеріалів виробництва шлакового гравію // Східно-європейський журнал передових технологій. — 2013. — №3/8 (63). — С. 13-17.
- 112 Ханик Я.М., Римар Т.І., Креховецький О.М. Гідродинаміка та кінетика процесу сушіння глини у щільному шарі під час ІЧ-нагрівання // Науковий вісник. Збірник науково-технічних праць НЛТУУ. – 2006. – Вип. 16.5. – С. 74-78.
- 113 Peters B., Bruch C. Drying and pyrolysis of wood particles: experiments and simulation// Journal of analytical and applied pyrolysis.- 2003.- Vol. 70(2).- P. 233-250.
- 114 Saastamoinen J, Richard J.R. Simultaneous drying and pyrolysis of solid fuel particles// Combustion and flame.- 1996- Vol. 106 (3).-P. 288-300.
- 115 Chen D., Zheng Y., Zhu X. In-depth investigation on the pyrolysis kinetics of raw biomass. Part I: Kinetic analysis for the drying and devolatilization stages //Bioresource technology.- 2013.- Vol. 131.-P. 40-46.
- 116 Collignan A., Nadeau J.P., Puiggali J.R. Description and analysis of timber drying kinetics// Drying technology.- 1993.- Vol. 11(3).-P. 489-506.
- 117 Tsiura N., Kindzera D., Huzova I., Atamanyuk, V. Study of the Kinetics of Drying Iron (II) Sulfate Heptahydrate by Filtration Method //ScienceRise.- 2021.- Vol. 1.-P. 11-21. doi:10.21303/2313-8416.2021.001583
- 118 Matkivska I., Gumnytskyi Y. and Atamanyuk V. Kinetics of Diffusion Mass Transfer during Filtration Drying of Grain Materials//JCCT Ch&ChT.-2014.- Vol. 8, No. 3.-P.359-363. doi:10.23939/chcht08.03.359
- 119 Ivashchuk O.S., Atamanyuk V.M., Gnativ Z.Ya., Chyzhovych R.A., Zhrebetskyi R.R. Research into kinetics of filtration drying of alcohol distillery stillage //Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii.- 2021.- No. 4.-P. 58-65. doi: 10.32434/0321-4095-2021-137-4-58-65
- 120 Рудобашта С.П. Фундаментальные исследования тепломассообмена при сушке // Вторая Международная научно-практическая конференция «Современные энергосберегающие тепловые технологии :Сушка и тепловые процессы». – Москва, 2005.- Том 1. -С. 7 – 19.
- 121 Рудобашта С.П., Дмитриев В.М. Кинетика и аппаратурно-технологическое оформление конвективной сушки дисперсных материалов // Первая Международная научно-практическая конференция «Современные энергосберегающие тепловые технологии :Сушка и Термовлажностная обработка материалов». – Москва, 2002.- Том 2. -С. 17 –27.

- 122 Мищенко С.В., Пономарев С.В., Беляев М.П., Толстых С.Г. Метод и устройство для измерения коэффициента диффузии влаги в коллоидных капиллярно-пористых материалах // Вторая Международная научно-практическая конференция «Современные энергосберегающие тепловые технологии :Сушка и тепловые процессы». – Москва, 2005.- Том 2. -С. 315 – 318.
- 123 Barna I., Gumnytskyi Y., Atamanyuk V. Intradiffusion mass transfer during of slag gravel raw granule. // Chemistry & Chemical Technology. Lviv Polytechnic National University, 2013. – Vol. 7, No. 4. – P. 129 – 137.
- 124 Nunez Vega A.-M., Hugenschmidt S., Hofacker W. C. Numerical simulation of the convective drying process of apple slices // DAAAM International scientific book.- 2012.- Vol.29.-P. 339-356.
- 125 Aparecida da Conceição Silva, Zaqueu Ernesto da Silva, Viviana Cocco Mariani, Sébastien Darche. Mass transfer during the osmotic dehydration of West Indian cherry // LWT - Food Science and Technology.-2012- Vol. 45.-P. 246-252.
- 126 Raquel P.F. and Barroca M. J. Estimation of the diffusivities and mass transfer coefficients for the drying of D. Joaquina pears // Proceedings of the World Congress on Engineering.- London,2013.- Vol.2.-P.1320-1323.
- 127 Кобулиев З. В. Бетон с наполнителем из измельченных стеблей хлопка// Жилищное строительство.-2006.-№ 8.-С.30-31.
- 128 Джумаев Д. С. Арболит на основе стеблей хлопчатника и технологические особенности его изготовления // Вестник Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры им. Н.Исанова.- 2012.-№3(37).-С. 10-15.
- 129 Гончаров Н.А., Курдюмова В.М. Плиты из стеблей хлопчатника // Плиты и фанера: Сборник научно-технических рефератов.- Москва, 1981.-№ 3.- С.14-15.
- 130 Кедельбаев Б. Ш., Есимова А.М., Нарымбаева З. К., Абильдаева Р. А., Кудасова Д. Е. Исследование процесса получения полисахаридов из гуза-пая //Международный журнал экспериментального образования. -2015.-№ 10.- С. 27-28.
- 131 Сиккима Р., Штайнер М., Юнгингер М., Гил У., Хансен М. Т., Фарадж А. Европейские рынки древесных гранул: текущее состояние и перспективы на 2020 год //Биотопливо, биопродукты и биоочистка.-2011.-№ 5 (3).-С. 250-278. doi: 10.1002/bbb.277.
- 132 Столярский М. Ю., Щуковский С., Тварковский Я., Кржижаняк М., Кульчинский П., Млечек М. Сравнение качества и стоимости брикетов, изготовленных из биомассы сельскохозяйственного и лесного происхождения// Возобновляемые источники энергии.-2013.-№ 57.-С. 20-26. doi: /10.1016/j.renene.2013.01.005.
- 133 Кауфман Б.Н. Теплопроводность строительных материалов.- М.: Госстройиздат, 1955.-159 с.
- 134 Филичкина М.В. Особенности древесных отходов как наполнителя при производстве биокompозитов // Современные направления научных

исследований XXI века: Теория и практика. -2014.-№2(2).- С.176-180. doi: 10.12737/2997.

135 Коузов П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов.- Л.: Химия, 1987.- 264 с.

136 Перов В.А., Андреев Е.Е., Биленко Л.Ф. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. –М.: Недра, 1990.-300 с.

137 Ходаков Г.С. Физика измельчения.- М.: Химия, 1972.- 307 с.

138 Плаченев Т.Г., Колосенцев С.Д. Порометрия. –Л.: Химия, 1988.-175 с.

139 Касаткин Л.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии.- М.: ООО ТИД "Альянс", 2004. -753 с.

140 Аэров М.Э., Тодес О.М., Наринский Д.А. Аппараты со стационарным зернистым слоем.- Л.: Химия, 1979.-176с.

141 Kobeyeva Z., Khussanov A., Atamanyuk V., Hnativ Z., Kaldybayeva B., Janabayev D. Energy - saving experimental setup for filtration drying and experimental research methods// V International Conference of «Industrial Technologist and Engineering» (ICITE 2018) dedicated to the 75TH anniversary of M.Auezov South Kazakhstan state university and 90TH anniversary of Academician S.T. Suleimenov holding within 4.0 Industrial Revolution. -Shymkent, 2018. -Том.4. – P.317-321.

142 Kobeyeva Z., Khussanov A., Atamanyuk V., Hnativ Z., Kaldybayeva B., Janabayev D. Hydrodynamics of the filtration drying of cotton stalks (pile cones) // Chemical Technology and Engineering: Monograph. –Lviv: Lviv Polytechnic National University, 2021. – 144 p.

143 Хусанов А.Е., Кобеева З.С., Калдыбаева Б.М., Турдыбекова Д. Кинетика фильтрационной сушки и изменение влагосодержания измельченных и гранулированных материалов// Туды МНПК «Ауезовские чтения-17: Новые импульсы науки и духовности в мировом пространстве».- Шымкент, 2019.- С.308-311.

144 Kobeyeva Z., Khussanov A., Atamanyuk V., Gnativ Z., Kaldybayeva B., Janabayev D., Gnylianska L. Analyzing the kinetics in the filtration drying of crushed cotton stalks// Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. –Vol.1/8(115).– P.55–66. doi: /10.15587/1729–4061.2022.252352.

145 Хусанов А.Е., Атаманюк В.М., Кобеева З.С., Калдыбаева Б.М., Джанабаев Д.Ж. Тепломассообменные закономерности фильтрационной сушки волокнистого материала// Технология текстильной промышленности. – Иваново, 2021.- №5(395).- С.162–168. doi:10.47367/0021-3497_2021_5_162.

146 Рабинович С.Г. Погрешность измерений – Л.: Энергия. – 1978. – 261 с.

147 Кудряшова Ж.Ф., Рабинович С.Г. Методы обработки результатов наблюдений при косвенных измерениях– Л.: ВНИИМ, 1975. – Вып. 172(234). – С. 3-58.

148 Румшинский Л.З. Математическая обработка результатов экспериментов. – М.: Наука, 1997. – 132с.

149 Khussanov A. Ye., Atamanyuk V.M., Kaldybayeva B.M., Abilmagzhanov A.Zh. Janabayev D., Kobeyeva Z. Mechanism of filtration drying of organic materials of fibrous structure and results of research of external heat exchange// News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan Series Chemistry and Technology. -2020.-Vol.6 (444).- P.87 – 94. doi:10.32014/2020.2518-1491.102.

150 Guzyova I., Khanyk Ya., Atamanyuk V. Calculation of kinetic factors of filtration drying of disperse materials in conditions of reducing a height lay// Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy.-2003. –Vol.13(1).-P. 117–121.

151 Максудов И.Т., Нуралиев А.Н. Справочник по первичной обработке хлопка. –Ташкент: НПО «Хлопкопром»,1994.-565с.

152 Хусанов А.Е., Атаманюк В.М., Кобеева З.С., Калдыбаева Б.М., Установка фильтрационной сушки для переработки измельченных древесных сельскохозяйственных отходов// Труды МНПК «Ауэзовские чтения – 19: 30 лет Независимости Казахстана». - Шымкент, 2021.-Том 7.- С. 94-96.

153 Муштаев В.И., Ульянов В.М. Сушка дисперсных материалов. – М.: Химия, 1988. – 352с.

154 Бойдадаев.М.Б. Негматов С. С., Мунаввархонов З. Т. Насриддинов А. Ш. Технология производства древесно-пластиковых композиционных плитных материалов на основе наполнителей из стеблей хлопчатника // Universum: технические науки : электрон. научн. журн.- 2019. -№ 12 (69).-С.1-4.

ПРИЛОЖЕНИЕ А





РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

(19) KZ (13) U (11) 6241

(51) F26B 3/06 (2006.01)

F26B 13/00 (2006.01)

F26B 11/02 (2006.01)

МИНИСТЕРСТВО ЮСТИЦИИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(21) 2021/0279.2

(22) 19.03.2021

(45) 16.07.2021, бюл. №28

(72) Хусанов Алишер Евадиллоевич (KZ);
Калдыбаева Ботагоз Мырзахметовна (KZ);
Атаманюк Володимир Михайлович (UA); Кобеева
Загира Сапарбековна (KZ); Хусанов Жахонгир
Евадиллоевич (KZ); Сабырханов Марат Дарханович
(KZ)

(73) Некоммерческое акционерное общество
«Южно-Казахстанский университет имени
М.Ауэзова»

(56) UA 78453, 25.03.2013 г.

(54) **УСТАНОВКА ФИЛЬТРАЦИОННОЙ
СУШКИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ**

(57) Полезная модель относится к сушке сыпучих
материалов с использованием тепла и может
использоваться в химической, пищевой,
строительной, деревообрабатывающей, легкой и
других отраслях промышленности.

Полезная модель позволяет обеспечивать
равномерное гидравлическое сопротивление вдоль
всей камеры сушки, что даст возможность
равномерно высушивать одновременно слой
материала, упростить конструкцию, снизить
металлоемкость и потери тепловой энергии
установки за счет дифференциальной перфорации
средства транспортировки и крышки корпуса

камеры сушки с уменьшением живого сечения в
направлении движения высушиваемого материала,
размещения системы распределения теплоносителя
непосредственно в камере сушки расположенной с
уменьшающим шагом в направлении движения
высушиваемого материала.

Установка фильтрационной сушки сыпучих
материалов состоит из бункера, который оснащен
вибратором, дозатором, шибером для регулирования
скорости подачи влажного материала и
разгрузочный патрубок с выгрузкой материала на
вагонетки. Зона сушки материала состоит из камеры
разрежения, над которой неподвижно установлено
средство транспортировки материала и камеры
сушки закрытой крышкой. Камера разрежения
соединена с вакуум насосом для отвода
отработанного теплового агента, расход теплового
агента регулируется с помощью шибера.
Транспортное средство снабжено механизмом
регулирования угла наклона. Транспортное средство
и крышка камеры сушки выполнены
дифференциально-перфорированной с уменьшением
живого сечения в направлении движения
высушиваемого материала. Система распределения
теплоносителя размещена непосредственно в камере
сушки расположенной с уменьшающим шагом в
направлении движения высушиваемого материала.

(19) KZ (13) U (11) 6241

Полезная модель относится к сушке сыпучих материалов с использованием тепла и может использоваться в химической, пищевой, строительной, деревообрабатывающей, легкой и других отраслях промышленности.

Известна установка фильтрационной сушки сыпучих материалов, содержащая загрузочный бункер с шибером, камеру сушки с разгрузочным бункером и камеру разрежения, между которыми размещено средство для транспортировки высушиваемого материала. [Патент Украины № 18113 МПК F26B 3/06. Установка фильтрационной сушки сыпучих материалов. Опубл. 16.10.2006. Бюл. №10].

Однако вследствие того, что средство для транспортировки высушиваемого материала изготовлен в виде транспортера из двух цепных передач, который расположен горизонтально, при наличии шибера высота слоя сыпучего материала будет одинаковой как со стороны загрузочного бункера, так и со стороны разгрузочного. Известно, что гидравлическое сопротивление материала при фильтрационной сушке уменьшается вследствие удаления влаги, поэтому со стороны загрузочного бункера сопротивление материала будет больше, чем со стороны разгрузочного бункера, а скорость фильтрации теплового агента будет расти. Это приводит к неравномерности сушки, перерасхода энергии и перегрева материала, что особенно негативно влияет на качество термолabileльных материалов. Кроме того, транспортер, выполненный в виде двух цепных передач требует определенных затрат на эксплуатацию, изготовление и ремонт. Это усложняет конструкцию технологического оборудования и снижает производительность установки в целом.

Наиболее близкой является установка фильтрационной сушки сыпучих материалов, содержащая загрузочный бункер с шибером, камеру сушки с разгрузочным патрубком и камеру разрежения, между которыми размещено средство для транспортировки высушиваемого материала. Средство для транспортировки выполнено в виде перфорированной пластины, неподвижно закрепленной на камере разрежения, которая установлена с возможностью регулирования угла наклона, а сушильная камера оснащена дозатором для регулирования скорости выгрузки высушенного материала. [Патент Украины №78453 МПК UA F26B 3/06 Атаманюк В.М., Гузьова І. О., Матківська І. Я., Мазяр Г. О. опубл. 25.03.2013. Бюл. №6].

Но сушильная камера этой установки изготовлена из сплошных металлических листов, что увеличивает металлоемкость установки и требует толстого слоя теплоизоляции. Кроме этого, система нагрева теплового агента расположена вне установки, что в свою очередь увеличивает габариты, и требует тепловой изоляции трубопроводов, расположенных между теплогенератором и сушильной установкой, данная установка характеризуется большими габаритами и большими потерями тепловой энергии в окружающую среду.

В настоящей полезной модели решается задача по усовершенствованию конструкции фильтрационной сушильной установки для сыпучих материалов, обеспечивающая равномерное гидравлическое сопротивление вдоль всей камеры сушки, что даст возможность равномерно высушивать одновременно слой материала, упростить конструкцию, снизить металлоемкость и потери тепловой энергии установки за счет дифференциальной перфорации средства транспортировки и крышки корпуса камеры сушки с уменьшением живого сечения в направлении движения высушиваемого материала, размещения системы распределения теплоносителя непосредственно в камере сушки расположенной с уменьшающим шагом в направлении движения высушиваемого материала.

Технический результат при использовании предлагаемой полезной модели заключается в достижении равномерной сушки слоя сыпучего материала, упрощении конструкции, снижении металлоемкости и потери тепловой энергии при дифференциальной перфорации средства транспортировки и крышки корпуса камеры сушки с уменьшением живого сечения в направлении движения высушиваемого материала, размещения системы распределения теплоносителя непосредственно в камере сушки расположенной с уменьшающим шагом в направлении движения высушиваемого материала.

Поставленная задача решается тем, что установка фильтрационной сушки сыпучих материалов содержит загрузочный бункер с шибером, камеру сушки с разгрузочным патрубком и камеру разрежения, закрытой крышкой между которыми размещено средство для транспортировки высушиваемого материала, согласно полезной модели, средство для транспортировки и крышка корпуса камеры сушки выполнены с уменьшением живого сечения в направлении движения высушиваемого материала, при этом средство для транспортировки неподвижно закреплено между камерой сушки и камерой разрежения и установлено с возможностью регулирования угла наклона, а система распределения теплоносителя размещена непосредственно в камере сушки расположенной с уменьшающим шагом в направлении движения высушиваемого материала, камера разрежения соединена с вакуум насосом для отсоса отработанного теплового агента.

На фиг. 1 схематически изображена конструкция фильтрационной сушильной установки сушки сыпучего материала; на фиг. 2 – схематичный вид сверху транспортного средства и крышки корпуса сушильной камеры с дифференциальной перфорацией.

Установка фильтрационной сушки сыпучих материалов состоит из бункера 1, который оснащен вибратором 2, дозатором 3 и шибером 4 для регулирования скорости подачи влажного материала. Зона сушки материала состоит из камеры разрежения 5, над которой неподвижно установлено средство транспортировки 6 материала и камеры

сушки закрытой крышкой 7. В нижней части сушильной камеры установлен дозатор 8 для регулирования скорости выгрузки высушиваемого материала и разгрузочный патрубок 9. На фигуре также изображены вагонетки 10. Камера разрежения 5 соединена с вакуум насосом 11 для отвода отработанного теплового агента, расход теплового агента регулируется с помощью шиберов 12. Транспортное средство снабжено механизмом регулирования 13 угла наклона. В камере разрежения установлены система распределения теплоносителя 14.

Сопоставительный анализ заявляемого технического решения с прототипом показывает, что заявляемое устройство отличается от известного новой конструкцией транспортного средства и крышкой камеры сушки с дифференциальной перфорацией с уменьшением живого сечения в направлении движения высушиваемого материала. Система распределения теплоносителя размещена непосредственно в камере сушки расположенной с уменьшающим шагом в направлении движения высушиваемого материала, камера разрежения соединена с вакуум насосом для отсоса отработанного теплового агента.

Установка работает следующим образом. В сушильную камеру с помощью системы распределения теплоносителя 14 подается тепловой агент. Создают разрежение в камере 5. Из бункера 1 с помощью вибратора 2, дозатора 3 и шиберов 4 влажный материал поступает на верхнюю часть транспортного средства 6 с дифференциальной перфорацией с уменьшением живого сечения в направлении движения высушиваемого материала и перемещается по ней под действием силы тяжести и с помощью дозатора 8 в направлении разгрузочного патрубка 9. Воздух отсасывается с наружи через крышку корпуса 7 камеры сушки нагревается с помощью системы нагрева и распределения теплоносителя 14. За счет созданного разрежения вакуум насосом 11 тепловой агент фильтруется сквозь слой влажного материала, высушивая его. Сухой материал из нижней части перфорированной

пластины 6 выгружается с помощью дозатора 8 на вагонетки 10.

Выполнение транспортного средства и крышки корпуса камеры сушки с дифференциальной перфорацией с уменьшением живого сечения в направлении движения высушиваемого материала позволит создать одинаковое гидравлическое сопротивление вдоль всей камеры разрежения и уменьшится материалоемкость установки. Размещение системы распределения теплоносителя непосредственно в камере сушки обеспечивает равномерную сушку, исключая его перегрев, что приведет к уменьшению эксплуатационных затрат и повысит эффективность процесса. Также это позволит исключить затраты на эксплуатацию, изготовление и ремонт транспортера. Дозатор, установленный на выходе из сушильной камеры, обеспечивает регулировку скорости выгрузки высушенного материала. Все это приведет к увеличению производительности установки.

ФОРМУЛА ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ

1. Установка фильтрационной сушки сыпучих материалов, содержащая загрузочный бункер с шибером, камеру сушки с разгрузочным патрубком и камеру разрежения, между которыми размещено средство для транспортировки высушиваемого материала, неподвижно закрепленной на камере разрежения, которая установлена с возможностью регулировки угла наклона, отличающаяся тем, что средство для транспортировки и крышка корпуса камеры сушки выполнены дифференциально перфорированной с уменьшением живого сечения в направлении движения высушиваемого материала, при этом камера разрежения соединена с вакуум насосом для отсоса отработанного теплового агента.

2. Установка по п.1, которая отличается тем, что система распределения теплоносителя размещена непосредственно в камере сушки расположенной с уменьшающим шагом в направлении движения высушиваемого материала.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Ф.7.07-14

Согласовано:
Проректор по НИР и И

(Ф.И.О. подпись) С. С. Сүлейменов У.С.
«24» 09 2021г.

Утверждаю:
Проректор по НИР и И УМР

(Ф.И.О. подпись) Р. Д. Абишева Р.Д.
«24» 09 2021г.

АКТ № 07 24.09.21

внедрения результатов научных исследований по диссертации Кобеевой З.С. на тему «Гидродинамика и тепломассообмен при фильтрационной сушке измельченной древесины» на соискание ученой степени PhD, выполненной в соответствии с госбюджетной ГБ НИР 21-01-05 «Разработка методики конструирования и расчета высокоэффективных тепломассообменных аппаратов и устройств общепромышленного назначения» в учебный процесс.

Стебель хлопчатника (гуза-пай) является целлюлозосодержащим отходом. В измельченном виде стебли хлопчатника можно использовать при производстве теплоизоляционно-конструкционных строительных материалов. Для реализации поставленной задачи, в сфере производства строительных материалов, следует внедрить новые технологии – ресурсосберегающего и энергоэффективного направления с использованием отходов сельскохозяйственного производства на основе дешевого местного сырья. На основе проведенных исследований разработана новая конструкция установки фильтрационной сушки сыпучих материалов. Новизной конструкции является средство для транспортировки и крышка корпуса камеры сушки, которые выполнены дифференциально перфорированными. Дифференциальная перфорация обеспечивает равномерность сушки, тем самым сохраняя качество высушиваемого материала. Разработаны методики расчета, рекомендации по проектированию и эксплуатации фильтрационной сушильной установки, которые внедрены в учебный процесс.

Основные результаты были опубликованы в научном журнале: _ Khussanov A. Ye., Atamanyuk V.M., Kaldybayeva B.M., Abilmagzhanov A. Zh., Janabayev D.Zh., Kobeyeva Z.S. Mechanism of filtration drying of organic materials of fibrous structure and results of research of external heat exchange //News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan:Series Chemistry and Technology, 2020.- Vol. 3.-No. 441.-P.134 – 141.

Настоящий акт составлен по итогам НИР, выполненной на кафедре «Технологические машины и оборудование» в 2018-2021 г.г.

Настоящим актом подтверждается, что результаты НИР по созданию фильтрационной сушки материалов волокнистой структуры и методики расчета,

выполненные докторантом Кобеевой З.С.

под руководством к.т.н., доцента А.Е. Хусанова и д.т.н., профессора В.М. Атаманюка

внедрены в учебный процесс:


в лекционные занятия по дисциплине «Процессы и аппараты химической технологии» в разделе «Лекция №27. Сушка. Способы тепловой сушки»

(указывается наименование дисциплины и ее разделы)

в практические занятия по дисциплине «Процессы и аппараты химической технологии» для выполнения расчетов по заданию «Пр. занятие №14. Рассчитать непрерывно действующую сушилку»

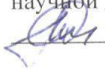
(указывается наименование дисциплины и ее разделы)

Научный руководитель темы

 Хусанов А.Е.

Начальник отдела координации

научной деятельности ДАН

 Серкебаев М.К.

Директор ДАВ

 Наукенова А.С.

Директор ДАН

 Назарбек У.Б.

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Ф.7.07-14



АКТ № 07

внедрения результатов научных исследований по диссертации Кобеевой З.С. на тему «Гидродинамика и тепломассообмен при фильтрационной сушке измельченной древесины» на соискание ученой степени PhD, выполненной в соответствии с госбюджетной ГБ НИР 21-01-05 «Разработка методики конструирования и расчета высокоэффективных тепломассообменных аппаратов и устройств общепромышленного назначения» в учебный процесс.

Стебель хлопчатника (гуза-пай) является целлюлозосодержащим отходом В измельченном виде стебли хлопчатника можно использовать при производстве теплоизоляционно-конструкционных строительных материалов. Для реализации поставленной задачи, в сфере производства строительных материалов, следует внедрить новые технологии – ресурсосберегающего и энергоэффективного направления с использованием отходов сельскохозяйственного производства на основе дешевого местного сырья. На основе проведенных исследований разработана новая конструкция установки фильтрационной сушки сыпучих материалов. Новизной конструкции является средство для транспортировки и крышка корпуса камеры сушки, которые выполнены дифференциально перфорированными. Дифференциальная перфорация обеспечивает равномерность сушки, тем самым сохраняя качество высушиваемого материала. Разработаны методики расчета, рекомендации по проектированию и эксплуатации фильтрационной сушильной установки, которые внедрены в учебный процесс.

Основные результаты были опубликованы в научном журнале: _ Khussanov A. Ye., Atamanyuk V.M., Kaldybayeva B.M., Abilmagzhanov A. Zh., Janabayev D.Zh., Kobeyeva Z.S. Mechanism of filtration drying of organic materials of fibrous structure and results of research of external heat exchange //News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan:Series Chemistry and Technology, 2020.- Vol. 3.-No. 441.-P.134 – 141.

Настоящий акт составлен по итогам НИР, выполненной на кафедре «Технологические машины и оборудование» в 2018-2021 г.г.

Настоящим актом подтверждается, что результаты НИР по созданию фильтрационной сушки материалов волокнистой структуры и методики расчета, выполненные докторантом Кобеевой З.С.

под руководством к.т.н., доцента А.Е. Хусанова и д.т.н., профессора В.М. Атаманюка внедрены в учебный процесс:

в лекционные занятия по дисциплине «Лекция №16. Оборудование для сушки твердых материалов» в разделе «Сушка древесины»

(указывается наименование дисциплины и ее разделы)

в практические занятия по дисциплине «Оборудование для сушки твердых материалов» для выполнения расчетов по заданию «Пр. занятие №8. Расчет тепломассообменных характеристик при сушке дисперсных материалов»

(указывается наименование дисциплины и ее разделы)

Научный руководитель темы
 Хусанов А.Е.

Директор ДАВ
 Науkenова А.С.

Начальник отдела координации
научной деятельности ДАН
 Серкебаев М.К.

Директор ДАН
 Назарбек У.Б.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г



Утверждаю
Директор ТОО
"Хлопкоперерабатывающий
завод Мырзакент"
Жабуов Е.М.
2021г

АКТ ВНЕДРЕНИЯ результатов научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ

ЗАКАЗЧИК – ТОО "Хлопкоперерабатывающий завод Мырзакент"
НАСТОЯЩИМ АКТОМ ПОДТВЕРЖДАЕТСЯ, что результаты Государственной бюджетной научно-исследовательской работы Б-16-01-05 "Разработка методики конструирования и расчета высокоэффективных теплообменных аппаратов и устройств общепромышленного назначения" "Реконструкция аппаратного оформления технологической схемы производства композиционных древесно-стружечных плит из стеблей хлопка и полимерных связующих". ВЫПОЛНЕННОЙ работниками ТОО "Хлопкоперерабатывающий завод Мырзакент" и ЮКУ им М.О.Ауезова,

ПРОВОДИМОЙ в период 01.06.2021г. по 30.11.2021г.

ВНЕДРЕННЫ на ТОО "Хлопкоперерабатывающий завод Мырзакент"

1. **Вид внедряемых результатов:** техническая документация на конструкцию фильтрационной сушки измельченных стеблей хлопчатника.
2. **Характеристики масштаба внедрения:** единичное.
3. **Форма внедрения:** промышленно-опытная установка.
4. **Новизна результатов научно-исследовательских работ:** Сравнительно новое решение конструкции фильтрационной сушильной установки для сушки измельченных стеблей хлопчатника (гуза пая) установленный в производстве композитных древесно-стружечных плит из стеблей хлопка и полимерных связующих позволило значительно повысить эффективность процесса.
5. **Опытно-промышленная проверка:** промышленные испытания фильтрационной сушильной установки для сушки измельченных стеблей хлопчатника, установленного для сушки измельченных стеблей хлопчатника в производстве композитных древесно-стружечных плит с 01.06.2021г. по 30.10.2021 г
6. **Внедрен:** Фильтрационная сушильная установка для сушки измельченных стеблей хлопчатника.
7. **Фактический годовой экономический эффект:** За счет снижения температуры сушильного теплового агента до 80⁰С снижен расход электроэнергии за 1 тонну перерабатываемого хлопка с 2657,1кВт·ч до 953 кВт·ч.
8. **Объем внедрения:** одна технологическая линия.
9. **Социальный и научно-технический эффект:** снижение расхода электроэнергии, улучшение условий труда, снижение пожароопасности производства.
10. **Приложение:** Акт промышленных испытаний.

От ТОО "Хлопкоперерабатывающий
завод Мырзакент"

Гл специалист

 Джорабеков Н.Ж.

Инженер

 Пулатов А.А.

Начальник цеха

 Бекбаев Н.М.


От ЮКУ им. М.Ауезова

Научный руководитель:

 Хусанов А.Е.

Исполнители:

 Кобеева З.С.

 Калдыбаева Б.М.



**Технико-экономический расчет
эксплуатационных затрат на процесс фильтрационной сушки
измельченных стеблей хлопчатника**
(Акт внедрения от 30.11.2021 г)

Технико-экономический расчет затрат энергии на процесс фильтрационной сушки осуществляли по следующей методике. Тепловой баланс сушилки рассчитываем по следующим зависимостям [1]:

- количество теплового агента, необходимое для испарения влаги

$$L = \frac{W}{3600 \cdot (w_0^c - w_k^c)}, \left[\frac{\text{кг}}{\text{с}} \right] \quad (1)$$

где W – количество влаги, которое необходимо выпарить, кг;

w_0^c, w_k^c – соответственно начальное и конечное влагосодержание материала рассчитан на сухую массу, $\frac{\text{кг } H_2O}{\text{кг сух. м.}}$.

– объемный расход теплового агента

$$V = \frac{L}{\rho}, \left[\frac{\text{м}^3}{\text{с}} \right] \quad (2)$$

где ρ – плотность теплового агента при средней температуре, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

– необходимое количество теплоты для нагрева влажного материала

$$Q_M = \frac{G_c}{3600} \cdot c_M \cdot (T_K - T_n) + \frac{W}{3600} \cdot c_B \cdot (T_K - T_n), [\text{кВтм}] \quad (3)$$

где G_c – масса сухого материала, кг;

c_M, c_B – теплоемкость сухого материала и воды соответственно, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$,

T_n, T_K – начальная и конечная температура дисперсного материала соответственно, К.

– количество тепла для нагрева теплового агента

$$Q_{m.a.} = L \cdot c_{\text{воз}} \cdot (t_k - t_n), [\text{кВтм}] \quad (4)$$

$t_{п}, t_{к}$ - начальная и конечная температура теплового агента соответственно, $^{\circ}C$.

– количество теплоты на испарение свободной влаги

$$Q_{исп} = \frac{W}{3600} \cdot r, \quad [кВт] \quad (5)$$

где W – количество влаги, которое необходимо испарить, $\frac{кг}{час}$,

r – удельная теплота парообразования, $\frac{кДж}{кг}$.

– количество теплоты на компенсацию энергии связи влаги с материалом

$$Q_{ком.} = \frac{a}{2} \cdot (w_n^c - w_k^c) \cdot \frac{W}{3600}, \quad [кВт] \quad (6)$$

– потери теплоты в окружающую среду определяли согласно рекомендациям [2]. Для случая, когда поверхность сушилки неизвестна, автор рекомендует принимать удельные потери теплоты в окружающую среду в расчете на 1 кг испаренной влаги на уровне $q_{ном} = 125 \div 420 \frac{кДж}{кг H_2O}$ (меньшие величины автор рекомендует принимать для высоко влажных материалов), тогда

$$Q_{ном} = \frac{W \cdot q_{ном}}{3600} = \frac{W \cdot (125 \div 420)}{3600}, \quad [кВт] \quad (7)$$

Необходимо заметить, что фильтрационная сушка является низкотемпературной и соответственно потери теплоты в окружающую среду будут значительно меньше, чем в случае использования сушильных вращающихся барабанов, поэтому принимаем меньшее значение удельных потерь.

– суммарные затраты теплоты

$$Q = Q_m + Q_{т.а.} + Q_{исп} + Q_{ком} + Q_{отп}, \quad [кВт] \quad (8)$$

Расчет затрат на транспортировку теплового агента:

– производительность вентилятора

$$Q_{вент} = \frac{L}{\rho} + \frac{W}{3600 \cdot \rho_{пар}}, \quad \frac{м^3}{с} \quad (9)$$

где $\rho_{пар}$ – плотность водяного пара, $\frac{кг}{м^3}$.

– необходимая мощность привода вентилятора

$$N_{вент} = \frac{Q_{вент} \cdot \Delta P}{1000 \cdot \eta}, \quad [кВт] \quad (10)$$

где ΔP - потери давления, Па;

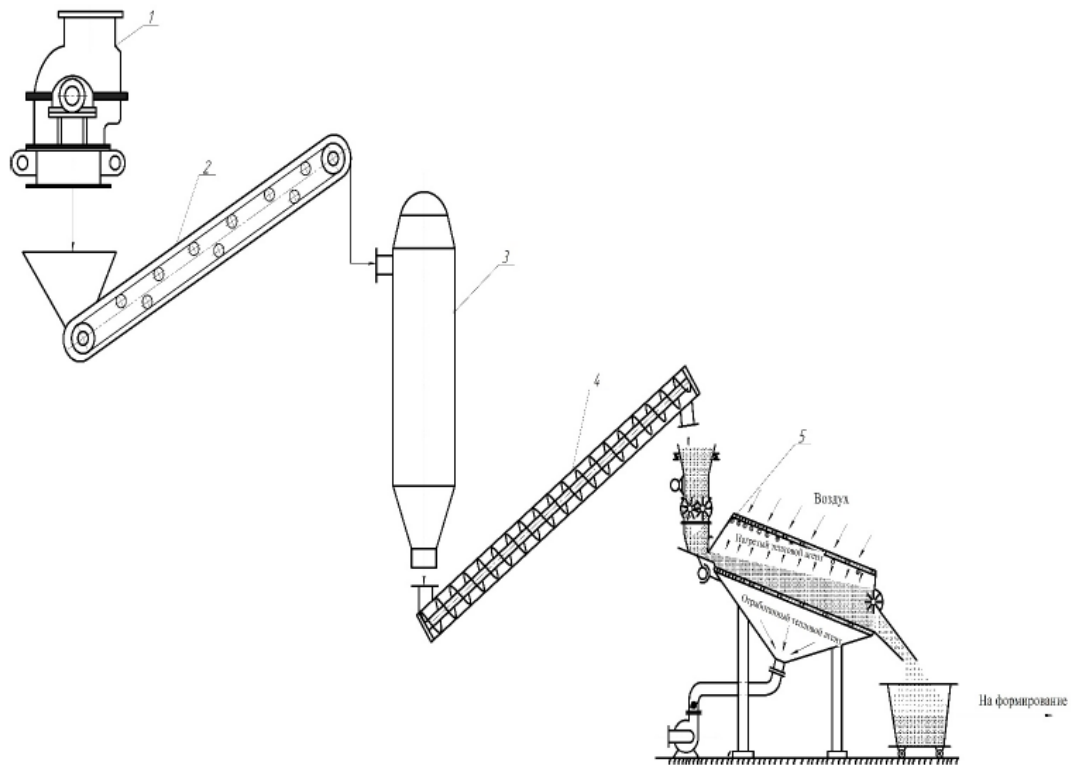
η – КПД вентилятора.

Для сравнения результаты технико-экономического расчета прямоточной барабанной сушильной установки с распределительной насадкой, мы использовали расчеты приведенные в работе [3]. Сравнительные характеристики барабанной и фильтрационной сушильных установок приведены в таблице Г.1.

Таблица Г.1 - Результаты расчета эксплуатационных затрат на сушку измельченных стеблей хлопчатника

Обозначение	Барабанная сушилка	Фильтрационная сушилка
$t_n, ^\circ C$	300	80
$t_k, ^\circ C$	100	40
$X_k \text{ кг } H_2O / \text{ кг сух. вез.}$	0,033	0,019
$T_k, ^\circ C$	100	35
$W, \text{ кг} / \text{ час}$	464,3	464,3
$L, \text{ кг} / \text{ с}$	7,3	7,3
$V, \text{ м}^3 / \text{ с}$	9,8	9,8
$Q_m, \text{ кВт}$	77,7	19,4
$Q_{т.а.}, \text{ кВт}$	2073,8	444,4
$Q_{знос}, \text{ кВт}$	321,5	321,5
$Q_{ком}, \text{ кВт}$	140,4	140,4
$Q_{втр}, \text{ кВт}$	16,2	16,2
$V_б, \text{ м}^3$	9	–
$D_б, \text{ м}$	1,5	1,8
$L_б, \text{ м}$	8,0	2,5
$n, \text{ об} / \text{ хв}$	1,5	0,2
$\alpha, \text{ градус}$	3	–
$N_б, \text{ кВт}$	22	1,1
$H, \text{ м}$	–	0,06
$S, \text{ м}^2$	–	10,6
$G_{вен}, \text{ кг} / \text{ с}$	1,38	3,24
$\nu_0, \text{ м} / \text{ с}$	0,98	1,5
$\Delta P, \text{ Па}$	2011	16000
$N_{вен}, \text{ кВт}$	5,5	10
$Q_\Sigma, \text{ кВт} \cdot \text{ час}$	2657,1	953
$\Delta Q_\Sigma, \text{ кВт} \cdot \text{ час}$		1704,1

Применение фильтрационного метода обезвоживания измельченных стеблей хлопка позволило уменьшить энергозатраты на процесс сушки в 2,59 раза по сравнению с барабанной сушилкой.



1-дробилка; 2-транспортер; 3- выпарной аппарат; 4- шнековый транспортер;
5-фильтрационная сушильная установка.

Литература

1. Biley P., Mykychak B., Kindzera D. External heat-and-mass transfer during drying of packed birch peeled veneer // Chemistry and Chemical Technology. –2013. – Vol. 7 (2). – P. 191–195.
2. Сажин. Б. С. Основы техники сушки.- М.:Химия, 1984.-320с.
3. Атаманюк В.М., Гумницький Я.М. Наукові основи фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів. - Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2013.-276с.

От ТОО "Хлопкоперерабатывающий завод Мырзакент"

Гл специалист



Джорабеков Н.Ж.

Инженер



Пулатов А.А.

Начальник цеха



Бекбаев Н.М.

От ЮКУ им. М.Ахезова

Научный руководитель:



Хусанов А.Е.

Исполнители:



Кобеева З.С.



Калдыбаева Б.М.