

ЮЖНО-КАЗАХСТАНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
им. М.АУЭЗОВА

УДК 66.047.76

На правах рукописи

ДЖАНАБАЕВ ДАУРЕН ЖУМАГАЛИЕВИЧ

РАЗРАБОТКА И РАСЧЕТ ПРОЦЕССА ФИЛЬТРАЦИОННОЙ СУШКИ  
МАТЕРИАЛОВ ВОЛОКНИСТОЙ СТРУКТУРЫ

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, 2020

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ.....</b>	<b>4</b>
<b>ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ.....</b>	<b>5</b>
<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>7</b>
<b>1 Современное представление вопросов сушки волокнистых материалов.....</b>	<b>14</b>
1.1 Анализ существующих типов оборудования и технологий сушки.....	14
1.2 Особенности сушки волокнистых материалов и используемое оборудование.....	21
1.3 Фильтрационный метод сушки и конструктивные решения .....	26
1.3.1 Разработки в области теории и практики фильтрационной сушки различных материалов.....	26
1.3.2 Методы гидродинамического расчета при фильтрационной сушке.....	30
1.3.3 Тепло - и массообмен при фильтрационной сушке.....	36
1.4 Постановка задач исследований.....	41
<b>2 Описание объекта и методика определения основных исследуемых параметров.....</b>	<b>44</b>
2.1 Определение основных теплофизических параметров процесса сушки и физико-химических свойств хлопка –сырца.....	44
2.2 Описание экспериментальной установки для исследования гидродинамических, кинетических и тепло - и массообменных параметров процесса фильтрационной сушки волокнистых материалов.....	52
2.3 Методика определения основных параметров пористой структуры слоя волокнистых материалов.....	55
2.4 Описание конструкций и принципа работы фильтрационной установки для сушки хлопка сырца.....	58
<b>3 Гидродинамика фильтрационной сушки хлопка сырца в стационарном слое.....</b>	<b>62</b>
3.1 Расчет гидродинамических параметров.....	63
3.2 Результаты экспериментальных исследований гидродинамики стационарного слоя волокна хлопка.....	65
<b>4 Механизм и кинетика фильтрационной сушки волокнистых материалов.....</b>	<b>70</b>
4.1 Механизм фильтрационной сушки волокнистых материалов.....	70
4.2 Влияние высоты слоя волокон хлопка сырца на процесс сушки.....	73
4.3 Экспериментальное исследование кинетики фильтрационной сушки волокон хлопка-сырца.....	75
<b>5 Тепломассообмен при фильтрационной сушке волокнистых</b>	

	<b>материалов.....</b>	<b>79</b>
5.1	Внешний теплообмен между тепловым агентом и сухими частицами волокнистого материала.....	79
5.2	Обобщение результатов экспериментальных исследований коэффициента теплоотдачи для сухого слоя материала.....	82
5.3	Исследование тепло - и массообмена между влажными частицами волокнистого материала и тепловым агентом.....	86
6	<b>Рекомендации по проектированию и внедрение фильтрационной сушильной установки.....</b>	<b>92</b>
6.1	Рекомендации по проектированию фильтрационной сушильной установки.....	92
6.2	Методики расчета фильтрационной сушильной установки.....	92
6.3	Промышленные испытания и внедрение фильтрационной сушильной установки.....	93
	<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>97</b>
	<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....</b>	<b>99</b>
	<b>ПРИЛОЖЕНИЯ.....</b>	<b>110</b>

## 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:

$A$  – коэффициент;

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

$B$  – коэффициент;

$b$  – ширина,  $\text{м}$ ;

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

$D$  – диаметр аппарата,  $\text{м}$ ; коэффициент диффузии,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$d$  – диаметр волокон, отверстия, частицы, эквивалентный диаметр,  $\text{м}$ ;  
влажность,  $\text{кг}/\text{кг}$ ;

$F$  – поверхность,  $\text{м}^2$ ; сила  $\text{Н}$ ;

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

$g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;

$H$  – высота,  $\text{м}$ ;

$I$  – энтальпия,  $\text{кДж}/\text{моль}$ ;

$K$  – коэффициент тепло-массопередачи,  $\text{м}/\text{с}$ ; коэффициент; константа;

$k$  – коэффициент;

$\ell$  – длина,  $\text{м}$ ;

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

$N$  – количество, шт;

$n$  – коэффициент;

$P$  – давление,  $\text{Па}$ ;

$\Delta P$  – гидравлическое сопротивление или перепад давления,  $\text{Па}$ ;

$Q$  – расход,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$\Delta Q$  – количество теплоты,  $\text{Дж}$ ;

$r$  – радиус,  $\text{м}$ ;

$S$  – площадь,  $\text{м}^2$ ; площадь поперечного сечения,  $\text{м}^2$ ;

$T$  – температура,  $\text{К}$ ;

$v$  – скорость,  $\text{м}/\text{с}$ ;

$V$  – объем,  $\text{м}^3$ ;

$\zeta$  – коэффициент гидравлического сопротивления;

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

$\beta$  – коэффициент массоотдачи,  $\text{м}/\text{с}$ ;

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

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

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

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

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

$\tau$  – время,  $\text{с}$ ; касательное напряжение,  $\text{Па}$ ;

$\Phi$  – коэффициент формы;

Числа:

*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, кожура;

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.** Сушильные установки являются неотъемлемой частью технологической схемы производства любого материала. Во многих перерабатывающих отраслях промышленности сушильное оборудование занимает приблизительно до 30 % производственных площадей, потребляет до 40 % всего расходуемого тепла и до 30 % электроэнергии [1].

Обычно промышленная сушилка представляет собой специализированную конструкцию использующую для высушивания сырья законы термодинамики, которая создает среду обладающую свойствами теплоносителя с целью отвода/подвода тепла, и высушивания таким образом обрабатываемого сырья. Для сушки материалов применяются самые разнообразные установки, различающиеся по виду теплообмена, свойствам сушильного агента, конструкциям аппаратов и режиму работы. Применение конкретных схем и отдельно взятых узлов определяется геометрией, химическими и физическими свойствами высушиваемого сырья, типом сушильного агента, режимами работы. Наиболее широко распространенными являются типовые конструкции сушильных установок: атмосферные, коридорные, барабанные, камерные, вакуумные, вакуумно-импульсные [2].

Теория сушки базируется на термодинамике влажного воздуха, тепломассообмене, тепломассопереносе, а также на учении о связи влаги с коллоидными капиллярно-пористыми телами [3].

При рассмотрении связи влаги с текстильными волокнами обычно выделяют три ее вида: гигроскопическую, капиллярную и грубокапиллярную. Гигроскопическая влага сорбируется волокном из окружающего воздуха и прочно удерживается волокном; ее удаление возможно при сильном пересушивании волокнистого материала, которое нежелательно, так как волокно становится жестким, хрупким частично утрачивает свойства смачивания. Капиллярная влага, содержится в порах набухшего волокна, поэтому она содержит асмотически связанную влагу. В зависимости от природы волокна ее содержание может достигать до 40 %, а удалять капиллярную влагу нужно сушкой [4].

При создании сушильного оборудования необходимо придерживаться следующих требований: конструкция оборудования должна обеспечивать равномерный нагрев и сушку продукта при надежном контроле его температуры и влажности, кроме того, сушильное оборудование должно иметь меньшую металлоемкость. При выборе типа и конструкции промышленной сушилки следует предварительно учесть следующие моменты: рабочий объем, принцип работы и тип сушильного агента, потребляемая мощность на один цикл, производительность, возможность совершенствования и наличие дополнительных опций [2].

Большая энергоемкость процесса приводит в целом по сушильной отрасли к неоправданным потерям энергии. Следствием последнего является также и снижение экологической чистоты как технологического процесса сушки, так и

собственно получаемых с помощью конвекционных технологий сушеных материалов. Очевидно, что современные и обеспечивающие высокое качество конечного продукта технологии сушки должны опираться на иные физические механизмы обезвоживания, на физические процессы, ход которых не так сильно связан с изменяющимися в процессе сушки собственными свойствами материалов (в первую очередь с их тепло- и массопроводностью).

**Основанием** для разработки темы явилось отсутствие результатов комплексного и системного подхода к интенсификации процессов сушки влажного волокна хлопка-сырца, учитывая то, что она содержит в основном связанную влагу, является термолабильным материалом, а процесс сушки проходит во втором периоде, а также необходимость разработки научно-обоснованной методики расчета фильтрационной сушильной установки при сушке волокнистых материалов.

**Исходными данными** к выполнению работы явились результаты исследований и методики расчета сушильных установок для сушки волокнистых материалов, а также гидродинамики и теплообмена сушильных аппаратов, использующих закономерности фильтрации сушильного агента через слой материала.

**Обоснованием необходимости проведения научно-исследовательской работы** послужила недостаточная изученность процесса сушки волокнистых материалов в сушильной установке использующего принцип фильтрации сушильного агента через слой материала.

**Сведения о планируемом научно-техническом уровне разработки.** Разработка конструкции сушильной установки для материалов волокнистой структуры и созданные методики расчета базируются на теоретических основах тепло- и массообмена в процессах сушки, фундаментальных законах механики жидкости и газа, что свидетельствует о высоком научно-техническом уровне разработки.

**Сведения о патентных исследованиях.** Проведенные патентные исследования на глубину 40 лет позволили сделать выводы о достоинствах и недостатках известных способов и конструкций сушильных установок, а сопоставительный анализ результатов патентных исследований сделать заключение, что предлагаемая новая конструкция фильтрационной сушильной установки для сушки материалов волокнистой структуры позволяет повысить эксплуатационную надежность, интенсивность и эффективность работы в процессе фильтрационной сушки хлопка-сырца, тем самым обеспечивая низкую энергоемкость процесса сушки.

**Сведения о метрологическом обеспечении научно-исследовательской работы.** В основу диссертационной работы положена официальная терминология Международной организации законодательной метрологии. В процессе проведения экспериментов использованы приборы, прошедшие государственную поверку в период эксплуатации, обеспечивающие соответствующий исследовательским и инженерным целям класс точности и соответствующие «Закону об обеспечении единства измерений». В



экспериментальных исследованиях использованы методики выполнения измерений, соответствующие «Закону об обеспечении единства измерений». В функциональных и графических зависимостях использованы единицы измерений, соответствующие системе СИ.

**Актуальность проблемы.** С целью подъема хлопковой и текстильной отраслей Казахстана был принят Закон «О развитии хлопковой отрасли» от 21 июля 2007 года N 298, с изменениями, внесенными Законом РК от 21.07.2015 № 336-V, создана свободная экономическая зона «Онтустик» на 2005-2030 годы, которая будет способствовать возрождению и развитию текстильной промышленности Казахстана [5].

По своему строению хлопок-сырец является неоднородным материалом и состоит из трех основных компонентов – самого хлопкового волокна, кожуры и ядра семян. Из семян хлопка изготавливают масло, техническое масло, мыло, глицерин, стеарин, целлюлозу а отходы семечки (выжимки) является ценным кормом для животных, его также используют для производства этилового и метилового спиртов, лимонной и уксусной кислоты и многих других продуктов [6]. Химический состав компонентов различен, поэтому различны и их влагопоглощающие свойства. Хлопковое волокно и кожура семян относятся к капиллярно-пористым материалам [7]. В целом хлопок-сырец является коллоидным капиллярно-пористым телом и содержит как свободную, так и связанную влагу [8]. Известно, что процесс удаления влаги из материала сопровождается нарушением связи ее с материалом, на что затрачивается значительное количество энергии.

Выбор режима сушки сырца зависит от следующих показателей: цвет, длина волокна, типа механического повреждения и тому подобное. Во время сушки хлопка-сырца важно выбрать оптимальный режим сушки, поскольку при несоответствующих параметрах сушки, наблюдается обрыв волокна, уменьшение его длины, в результате чего снижается качество волокна [9].

Теоретический анализ и проектирование систем сушки осложняются рядом факторов, в частности одновременным тепломассопереносом к поверхности и внутри материала, перенос влаги внутри материала, при этом существуют более 18 различных механизмов переноса влаги в твердом теле. Изменение влагосодержания и температуры материала определяется тепломассопереносом между поверхностью тела, окружающей средой и внутренней частью высушиваемого материала[3].

Одним из высокоинтенсивных методов удаления как свободной, так и связанной влаги является фильтрационная сушка. Это обусловлено тем, что во время фильтрационной сушки тепловой агент фильтруется сквозь пористую структуру влажного материала, который размещен на перфорированной перегородке в направлении «влажный материал–перфорированная перегородка». Скорость фильтрации теплового агента определяют исходя из технико-экономических соображений, учитывая то, что ее увеличение влияет на рост потери давления. Причем, действительная скорость движения теплового агента относительно элементов слоя значительно выше, чем в случае

сушки любыми другими методами (в кипящем слое, во время сушки в пневмотранспортных сушилках и др). Большая поверхность тепло - и массообмена и скорость теплового агента в порах и каналах стационарного слоя влажного материала обеспечивают высокие коэффициенты тепло - и массоотдачи и соответственно интенсивность фильтрационной сушки [10].

Вместе с этим суммарные затраты энергии на процесс фильтрационной сушки состоят из потерь давления в стационарном слое и нагрева теплового агента (воздух) до заданной температуры. Учитывая выше сказанное важно установить зависимость потерь давления в стационарном слое влажного волокна хлопка от фиктивной скорости фильтрации теплового агента, как важного фактора определяющего интенсивность и экономическую эффективность фильтрационной сушки.

Поэтому использование фильтрационного способа при сушке хлопка сырца и экспериментальные, теоретические исследования гидродинамики, сокращение энергетических расходов, сохранение исходного качества хлопка – сырца является актуальной задачей при переработке хлопка и имеет большое значение для развития хлопкового кластера Республики Казахстан.

Работа выполнялась в соответствии с направлением исследований по госбюджетной НИР ЮКГУ им. М.Ауэзова «Разработка методики конструирования и расчета высокоэффективных тепломассообменных аппаратов и устройств общепромышленного назначения» на 2016-2020 г.г.

**Объект и предмет.** Объектом исследований является установка фильтрационной сушки и волокна хлопка-сырца согласно Государственного стандарта [СТ РК 1095-2002](#) «Волокно хлопковое. Технические условия».

Предметом исследований явились гидродинамические закономерности, процессы тепломассообмена при фильтрационной сушке хлопка-сырца.

Методологической базой явились современные методы электронной микроскопии для определения свойств хлопка сырца, методы физических исследований для получения опытных коэффициентов тепло и массоотдачи, методы математического моделирования.

**Цель работы:** разработка научных основ процесса фильтрационной сушки материалов волокнистой структуры, создание научно-обоснованных методов их расчета и проектирования и апробация полученных результатов в опытно-промышленных условиях с реализацией в промышленности.

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

- экспериментально-теоретическое изучение гидродинамических закономерностей движения теплового агента сквозь пористую структуру хлопка-сырца;
- экспериментальное исследование процессов массо- и теплообмена в фильтрационной сушильной установке при сушке материалов волокнистой структуры и получение уравнений для расчета чисел Шервуда и Нуссельта;
- экспериментальное обоснование механизма сушки хлопка-сырца и обобщение результатов исследований;

-изучение кинетики сушки материалов волокнистой структуры в стационарном слое;

- разработка принципиальной схемы установки фильтрационного сушки и методику ее расчета;

- сравнение полученных результатов исследований с результатами сушки традиционными методами.

- разработка научно-обоснованной инженерной методики расчета фильтрационной сушильной установки и рекомендаций по проектированию и эксплуатации;

- промышленная апробация результатов исследования.

**Научная новизна работы** заключается в том, что на основе теоретических и экспериментальных исследований закономерностей фильтрационной сушки научно обоснована методология расчета фильтрационной сушильной установки для сушки материалов волокнистой структуры, на примере сушки хлопка-сырца. При этом:

- исходя из определенной геометрической формы волокон хлопка-сырца и гидродинамических закономерностей фильтрации теплового агента через стационарный слой волокнистых частиц неправильной формы установлено явление «усадки» под давлением напора теплового агента и получены уравнения для расчета поверхности, начальных и текущих удельных поверхностей волокон хлопка и эквивалентного диаметра пор и каналов;

- на основании зависимости Дарси-Вейсбаха выведена формула для расчета гидравлического сопротивления пористого стационарного слоя и получены уравнения для расчета коэффициента гидравлического сопротивления, учитывающие поверхность, начальные и текущие удельные поверхности и эквивалентный диаметр пор и каналов волокон хлопка-сырца;

- получены расчетные зависимости порозности слоя от фиктивной скорости теплового агента, коэффициента гидравлического сопротивления волокон хлопка и числа Эйлера от числа Рейнольдса на основании обобщения экспериментальных и теоретических данных степенной функции;

- установлены периоды полного и частичного насыщения теплового агента на основе исследования закономерностей фильтрации теплового агента через стационарный слой хлопка –сырца и обоснован механизм фильтрационной сушки;

-изучены закономерности кинетики фильтрационной сушки волокон хлопка-сырца в стационарном слое и рассчитана минимальная высота слоя, на которой тепловой агент полностью насыщается влагой, и определена ее зависимость от скорости фильтрации теплового агента;

-на основании теории подобия предложены критериальные зависимости чисел Нуссельта и Шервуда для определения коэффициентов теплоотдачи от теплового агента к слою сухих волокон хлопка-сырца и коэффициентов тепло - и массотдачи от теплового агента к влажному слою хлопка сырца при фильтрационной сушке.

**Практическая ценность работы.** Разработаны методики расчета, рекомендации по проектированию и эксплуатации фильтрационной сушильной установки для сушки материалов волокнистой структуры, на примере сушки хлопка-сырца.

Результаты исследований, методики расчета, рекомендации по проектированию промышленных аппаратов могут быть использованы преподавателями, инженерно-техническими и научными работниками различных отраслей промышленности, проектных организаций, научно-исследовательских и учебных институтов.

**Апробация практических результатов.** По результатам проведенных исследований разработана конструкция промышленной фильтрационной сушильной установки для сушки хлопка-сырца, которая внедрена на ТОО «Хлопкоперерабатывающий завод Мырзакент» в технологической схеме первичной переработки хлопка –сырца с экономическим эффектом по снижению энергопотребления до за 1 тонну перерабатываемого хлопка до 631,77 кВт·ч.

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 волокнистых материалов» (Приложение 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:**

- расчетные уравнения для расчета поверхности, начальных и текущих удельных поверхностей волокон хлопка и эквивалентного диаметра пор и каналов;
- уравнения для расчета гидравлического сопротивления пористого стационарного слоя и для расчета коэффициента гидравлического сопротивления, учитывающие поверхность, начальные и текущие удельные поверхности и эквивалентный диаметр пор и каналов волокон хлопка-сырца;
- экспериментальные результаты исследования гидродинамики фильтрации теплового агента через стационарный слой волокнистых частиц неправильной формы;
- расчетные зависимости порозности слоя от фиктивной скорости теплового агента, коэффициента гидравлического сопротивления волокон хлопка и числа Эйлера от числа Рейнольдса;
- результаты экспериментального исследования кинетики и механизм фильтрационной сушки хлопка-сырца в стационарном слое;

- уравнения для определения коэффициента теплоотдачи в зависимости от скорости движения теплового агента через сухой слой волокон хлопка и коэффициентов тепло- и массоотдачи через влажный слой волокон хлопка сырца при фильтрационной сушке;
- методика расчета, проектирования и эксплуатации промышленных фильтрационных сушильных установок для сушки волокнистых материалов.

# 1 СОВРЕМЕННОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ВОПРОСОВ СУШКИ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

## 1.1 Анализ существующих типов оборудования и технологий сушки

В сельском хозяйстве и в других перерабатывающих отраслях возникает проблема снижения влажности различного рода сырья и готовой продукции и материалов [2,4,11,12].

В агропромышленном комплексе и в отраслях легкой промышленности проблемами являются повышение сохранемости сельскохозяйственной продукции. В этих целях были созданы различные технологии сушки, которые в последние годы широко используются в перерабатывающих отраслях промышленности [13,14], формируется сушильная отрасль и увеличивается производство сельскохозяйственной продукции.

Реализация таких технико-экономических параметров, как минимально возможная энергоемкость процесса, максимальная однородность сушки, минимальное время выхода на заданную влажность и некоторых других характеристик обезвоживания. Это можно обеспечить правильным выбором подходящих к данной конкретной ситуации базовых физических процессов, приводящих к обезвоживанию продуктов, соответствующих им технологий сушки, а также за счет разработки конструкции оборудования, которые позволяют реализовать перечисленные процессы и технологии [15].

Существует различные технологий сушки -естественная сушка , аэрационная, конвекционная, сушка в псевдокипящем слое [3,16,17], инфракрасная сушка [18], микроволновая [13], сублимационная [15] и т.д. В работе проведен сравнительный анализ перечисленных способов сушки, базирующийся на использовании относительно небольшой системы параметров (критериев): производительности, энергоемкости, скорости сушки, сохранемости в процессе сушки полезных веществ, качества высушиваемого материала и витаминов и т.д [15, с.29]. По результатам анализа указанной работы можно сделать вывод о том, что во многих отраслях промышленности технологии и оборудование, основанные на конвекционных механизмах обезвоживания [14], не обеспечивают достаточно высокого качества получаемой продукции и характеризуются большой энергоемкостью процесса [15, с.30].

Современное сушильное оборудование должно быть универсальным в части возможности сушки различных материалов. Мы рассмотрим группы сушилок, которые перспективны для применения в процессе сушки в различных отраслях промышленности и объединены по принципу работы и конструкции [7]. Сушильные установки, многие авторы исследовавшие процессы сушки классифицируют по целому ряду признаков [1-3,18], которые приведены на рисунке 1.1:

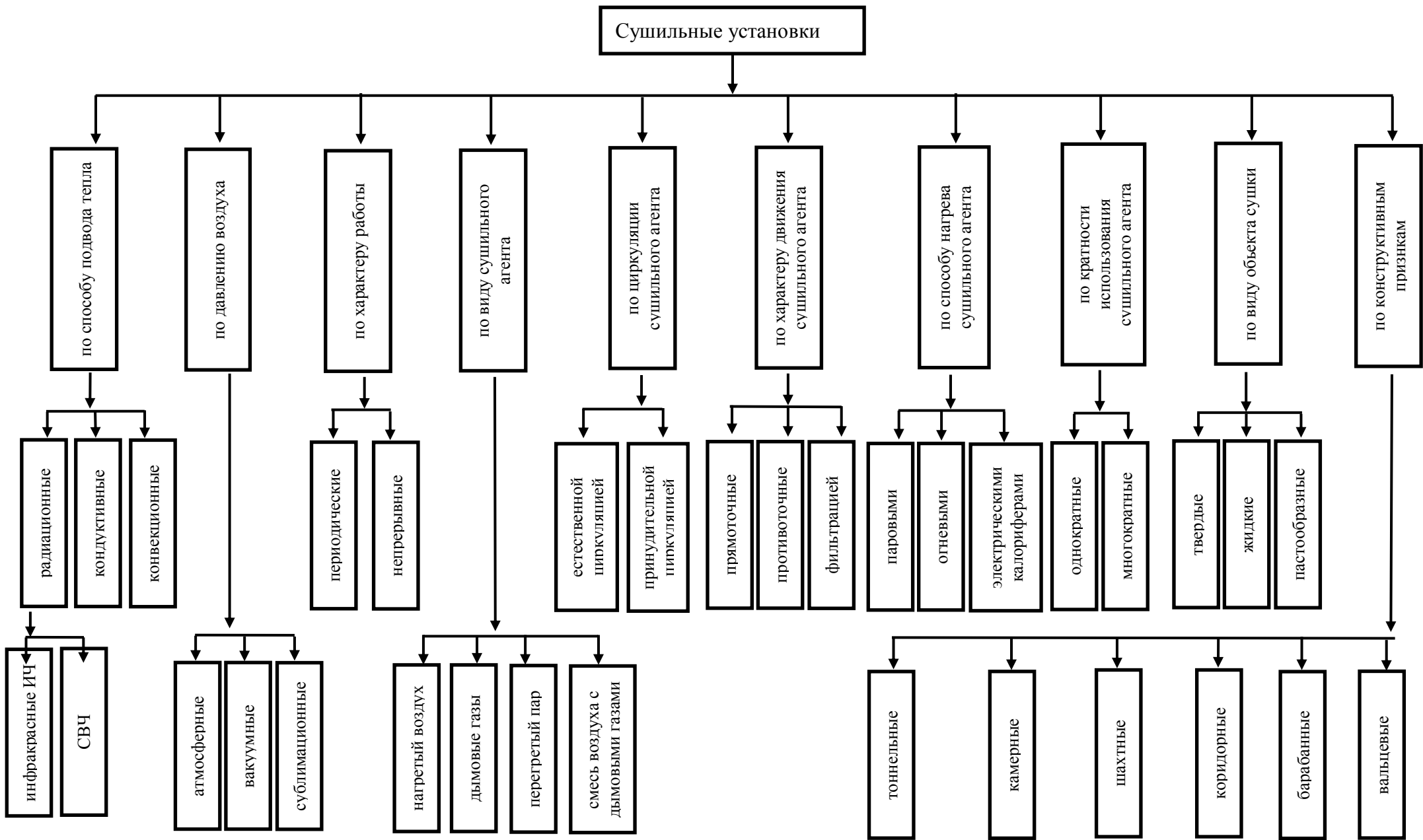


Рисунок 1.1-Классификация сушильных установок

Большая энергоемкость процесса приводит в целом по сушильной технике к неоправданным потерям энергии, повышенному потреблению жидких и газообразных видов топлива, энергия сжигания которых используется в процессах конвективной сушки. Следствием последнего является также и снижение экологической чистоты как техпроцесса сушки, так и собственно получаемых с помощью конвекционных технологий сушеной продукции [15, с.30].

Указанные проблемы есть и в других способах сушки, принцип которых основан на поверхностной сушке. Отсюда можно сделать вывод, что для обеспечения качества высушиваемого материала надо применять другие механизмы сушки, протекание которых не особо зависит от изменения свойств материала.

В данное время перспективным считаются применение ИК- сушки и микроволновой сушки [18]. Преимуществами таких сушилок являются: не требуется наличия теплоносителя, которая может привести к загрязнению материала; отсутствуют взрывоопасные концентрации и потери материала за счет уноса, материал не перегревается; тепловыделение происходит в объеме материала, интенсивность нагрева не зависит от агрегатного состояния материала.

При сушке тонких слоев использование ИК-нагрева приводит к интенсификации процесса в 1,5-2,0 раза, снижается энергозатраты в 1,5 раза [18].

Широко применяются в промышленности камерные, барабанные, пневматические, ленточные, с кипящим слоем и др. конвекционные сушилки [1,2].

В конвекционных сушилках нагретый тепловой агент, до максимально допустимой температуры, движется через рабочую камеру, непосредственно соприкасаясь с высушиваемым материалом. Отличительная особенность этого варианта – однократный нагрев и однократное использование сушильного агента.

Камерные сушилки работают при атмосферном давлении и используются в при сушке материалов температура сушки которых может достигать до 250-300°C и относятся аппаратам периодического действия. Процесс сушки происходит на лотках, установленных на стеллажах или вагонетках. Сушилка работает с промежуточным подогревом и частичной рециркуляцией воздуха, который обеспечивает низкую температуру и более мягкие условия сушки. Такие сушилки обладают низкой производительностью, из-за сушки в неподвижном толстом слое и отличаются неравномерностью сушки из-за неравномерности температур в камере, возникающей за счет частичного прохода воздуха в вышерасположенные зоны кратчайшим путем. Обслуживание камерных сушилок требует больших затрат ручного труда, что также является существенным недостатком [19]. Для сушки используется чистый нагретый воздух или смесь топочных газов с воздухом. Различаются двухкамерные, коридорного типа, шкафные камерные сушилки.



Туннельные сушилки отличаются от камерных тем, что в них соединенные друг с другом вагонетки медленно перемещаются на рельсах вдоль очень длинной камеры прямоугольного сечения. Перемещение вагонеток производится с помощью троса и механической лебедки. Сушильный агент движется прямооток или противотоком к высушиваемому материалу [19, с.53]. У туннельных сушилок недостатки такие же, как у камерных сушилок, к тому же сушилки такого типа обслуживаются вручную.

В ленточных сушилках процесс сушки осуществляется непрерывно при атмосферном давлении. В камере сушилки слой высушиваемого материала движется на бесконечной ленте, натянутой между ведущим и ведомым барабанами. Влажный материал подается на один конец ленты, а подсушенный удаляется с другого конца. Сушка осуществляется горячим воздухом или топочными газами, которые движутся противотоком или перекрестным током к направлению движения материала. Ленточные сушилки громоздки (подобно туннельным сушилкам) и сложны в обслуживании главным образом из-за перекосов и растяжения лент, их удельная производительность невелика, а удельные расходы тепла довольно высоки. Кроме того, они непригодны для сушки различных материалов, поэтому для этой цели их используют в комбинации с вальцовыми сушилками. В некоторых конструкциях в качестве сушильного агента применяется перегретый пар, иногда – в смеси с горячими инертными газами. Сушка перегретым паром представляет интерес для материалов, окисляющихся или загорающихся при повышенных температурах в присутствии кислорода воздуха. В конструктивном отношении эти сушилки сложны, так как во избежание попадания в них воздуха необходимо обеспечивать их герметичность [19, с.54].

Барабанные сушилки широко применяются для непрерывной сушки при атмосферном давлении кусковых, зернистых, волокнистых и сыпучих материалов. Она имеет цилиндрический барабан, установленный горизонтально или с небольшим наклоном к горизонту и опирающийся с помощью бандажей на ролики. Барабан приводится во вращение электродвигателем через зубчатую передачу и редуктор. Материал подается в барабан питателем, предварительно подсушивается, перемешиваясь лопастями приемно-винтовой насадки, а затем поступает на внутреннюю насадку, расположенную вдоль почти всей длины барабана. Насадка обеспечивает равномерное распределение и хорошее перемешивание материала по сечению барабана, а также его тесное соприкосновение при пересыпании с сушильным агентом – топочными газами. В простейшем случае насадка - это лопасти, приваренные к внутренней части корпуса барабана. Газы и материал особенно часто движутся прямооток, что помогает избежать перегрева материала, так как в этом случае наиболее горячие газы соприкасаются с материалом, имеющим наибольшую влажность. Скорость газов выбирают в зависимости от крупности и плотности материала [19, с.56].

В качестве сушильного агента в барабанной сушилке часто используются топочные газы, полученные при сжигании природного газа, мазута или другого

жидкого топлива (солярка, масло). Подача дымовых газов может осуществляться как непосредственно из горелки в барабан, так и посредством топки, которая позволяет регулировать степень разбавления дымовых газов воздухом. Топка используется, когда надо сушить материалы, разрушающиеся при высокой температуре. Устройство внутренней насадки барабана зависит от размера кусков и свойств высушиваемого материала [19, с.56].

Сушилки с кипящим (псевдооживленным) слоем являются одним из прогрессивных типов аппарата для сушки. Процесс в кипящем слое позволяет значительно увеличить поверхность контакта между частицами материала и сушильным агентом, интенсифицировать испарение влаги из материала и сократить (до нескольких минут) продолжительность сушки [12]. Сушилки с кипящим слоем в настоящее время успешно применяются в химической технологии не только для сушки сильносыпучих зернистых материалов (например минеральных и органических солей), но и материалов, подверженных комкованию, например для сульфата аммония, поливинилхлорида, полиэтилена и некоторых других полимеров. Сушилках этого типа с цилиндрическим корпусом наблюдается значительная неравномерность сушки, обусловленная тем, что при интенсивном перемешивании в слое, время пребывания отдельных частиц существенно отличается от его среднего значения [12, с182].

В сушилке с кипящим (псевдокипящим) слоем достигается интенсивное перемешивание материала, ускоренный тепло- и массообмен, благодаря чему сушильный агент может использоваться при повышенных температурах без значительной потери качества конечного продукта. Сочетая простоту устройства с высокой удельной производительностью и легкостью автоматизации, эти сушилки нашли широкое применение. Наиболее известны сушильные установки такого типа, выпускаемые московским предприятием «Биотех». Параметрический ряд этих сушильных установок с площадью эффективного сечения (продуваемого потоком нагретого воздуха) от нескольких десятков квадратных дециметров до нескольких квадратных метров используется для сушки самых различных продуктов. Сведения об энергоемкости процесса обезвоживания достаточно противоречивы, однако, по имеющимся оценкам [14], она несколько ниже, чем в классических конвекционных сушилках, и составляет 0,6-0,9 Вт/кг.

Специфика процесса обезвоживания в данных сушилках заключается в том, что нагретый воздух движется в вертикальном направлении (снизу вверх) с такой скоростью, что силы давления воздуха на частицы продукта уравнивают действующие на эти частицы гравитационные силы. В результате каждая частица как бы «парит» независимо от других и все элементы ее поверхности одинаково эффективно взаимодействуют с потоком нагретого воздуха, то есть вся площадь ее поверхности является площадью испарения, что несколько уменьшает энергоемкость процесса (по сравнению с упомянутыми выше ленточными сушилками). Однако тепло- и массообмен между внешней поверхностью частиц и их внутренними областями в этой

технологической схеме ничем не отличается от типичного для конвекционной сушки, что и приводит к многократному увеличению энергоемкости и снижению скорости сушки при малых влажностях продукта и соответственно к увеличению энергоемкости процесса [15, с.31].

В сушилках с виброкипящим слоем наложение вибрации на взвешенный (кипящий) слой материала позволяет улучшить его характеристики и повысить интенсивность теплообмена. Виброкипящий слой может быть создан в аппаратах самых разнообразных конструкций путем воздействия на сыпучий материал вибрирующих дна, стенок или дополнительных перегородок, а также с помощью специальных вибропобудителей, введенных непосредственно в сушильную камеру [15, с.32].

Применение виброкипящего слоя, позволяет улучшить перемешивание материала и тем самым в несколько раз повысить величину коэффициентов тепло- и массообмена.

Вибрационное воздействие в сочетании с подачей газа через пористое дно аппарата под слой сыпучего материала позволяет снизить скорость газа до значения ниже критического. Тогда роль газа как оживающего агента перестает являться определяющей. Сушилки виброкипящего слоя, движение частиц материала в которых происходит в основном за счет механических воздействий, обладают лучшими показателями, чем установки кипящего слоя.

Преимущество виброкипящего слоя заключается в значительном уменьшении количества проходящего через аппарат газа, а следовательно, упрощении и удешевлении очистки этого газа от пыли.

Эти особенности виброкипящего слоя выгодно отличают его от аэродинамического кипящего слоя и открывают широкие возможности для разнообразных режимов работы независимо от скорости газа и гранулометрического состава частиц. Эти сушилки являются одним из прогрессивных типов аппарата для сушки [20].

Влажный материал подается на перфорированный виброжелоб расположенный на раме и установленный на пружинах. Вибропривод создает колебания (вибрации) всей конструкции. На виброжелоб подается влажный материал, который оживается поступающим снизу горячим воздухом. Воздух для равномерного псевдооживления может подаваться в несколько патрубков одновременно и выходит также через несколько патрубков (на рисунке не показано). Расход высушенного материала регулируется заслонкой. В зависимости от частоты вибраций сушилка может работать различных газодинамических режимах, которые подбираются для каждого конкретного материала.

Вибросушилки применяются для сушки различных сыпучих зернистых материалов (песка, минеральных веществ, солей, пищевых продуктов и лекарственных препаратов). сушилка данной конструкции можно совмещать процессы сушки и охлаждения высушенного материала.

В гребковых вакуум-сушилках периодического действия скорость сушки несколько увеличивается за счет перемешивания материала медленно

вращающейся горизонтальной мешалкой с гребками; вместе с тем, они не требуют ручной загрузки и выгрузки материала подобно вакуум-сушильным шкафам [20].

Гребковая сушилка состоит из цилиндрического корпуса с паровой рубашкой и мешалки. Гребки мешалки закреплены на валу взаимно перпендикулярно; на одной половине длины барабана гребки мешалки изогнуты в одну сторону, на другой половине – в противоположную. Кроме того, мешалка имеет реверсивный привод, автоматически меняющий каждые 5—8 мин направление ее вращения. Поэтому при работе мешалки материал периодически перемещается от периферии к середине барабана и в обратном направлении. Вал мешалки может быть полым и через него можно также осуществлять нагрев высушиваемого материала. Свободно перекачивающиеся между гребками трубы способствуют разрушению комков и дополнительно перемешивают материал. Корпус сушилки соединен с поверхностным или барометрическим конденсатором и вакуум-насосом.

Следует отметить, что применение вакуумных сушилок в химической промышленности, несмотря на их более высокую стоимость и сложность по сравнению с атмосферными сушилками, диктуется технологическими соображениями: они пригодны для сушки чувствительных к высоким температурам, а также токсичных и взрывоопасных веществ, для получения высушенных продуктов повышенной чистоты, а также в тех случаях, когда необходимо улавливание (конденсация) паров неводных растворителей, удаляемых из материалов [17].

В вальцовых сушилках осуществляется непрерывная сушка жидких и текучих пастообразных материалов при атмосферном давлении или при разрежении. Основной частью двухвальцовых сушилок, наиболее часто применяемых в химических производствах, являются вальцы, медленно вращающиеся ( $n = 2—10$  об/мин) навстречу друг другу [2,19]. Материал покрывает поверхность вальцов тонкой пленкой, толщина которой определяется величиной зазора между вальцами. Коэффициент теплоотдачи при этом способе значительно выше, чем при конвекционной сушке, однако это не приводит к существенному снижению теплоемкости процесса, так как основные проблемы обоих методов обусловлены теплообменом не на границе материала, а в его внутренних слоях. Использование вальцовых сушилок на производстве из-за указанных недостатков весьма ограниченное [15, с.35].

Пневматические сушилки состоят из одной или нескольких последовательно соединенных вертикальных труб. Высушиваемый материал перемещается по этим трубам потоком сушильного агента, скорость которого превышает скорость движения наиболее крупных частиц (обычно 0,1-0,4 м/с). Вследствие кратковременности контакта (1-5 с) эта сушилка пригодна для термически нестойких материалов даже при высокой температуре сушильного агента.

Из проведенного анализа следует, что при достаточно больших значениях параметров тепло- и массопроводности во влажном материале, конвекционный

способ сушки имеет преимущества перед другими видами сушки из-за значительного высокого КПД, хотя немного уступает по показателям энергоемкости инфракрасной и микроволновой сушке. Таким образом, представляется целесообразным изучить и реализовать на практике возможность наиболее экономичного с энергетической точки зрения совмещения двух физических механизмов сушки и достижения на этой основе дальнейшего существенного снижения энергоемкости процесса обезвоживания.

## **1.2 Особенности сушки волокнистых материалов и используемое оборудование**

Условия сушки в промышленности настолько разнообразны, количество подвергаемых сушке материалов так велико и существующие сушилки настолько иногда не соответствует возможным оптимальным условиям, что иногда не следует давать жестких установок для выбора типов сушильных установок [1, с.157].

Все виды тканей, выпускаемых текстильными фабриками, проходят сушку в различных с стадиях производства, обычно после промывки и обезвоживания в центрифугах или на специальных отсасывающих приспособлениях, иногда составляющих с сушилкой единую конструкцию. Начальная влажность тканей в зависимости от способа обезвоживания 35÷50%, конечная после сушки 8,6-17% [1, с.302]. Иногда при дальнейшей обработке ткани в производстве конечная влажность еще более повышается в зависимости от технологических требований последующей обработки. Для сушки бязи, ситцев, подкладочного материала применяются цилиндрические сушилки. Цилиндрические сушилки дороги (медные тонкостенные цилиндры), ненадежны в эксплуатации (благодаря работе цилиндров под давлением) и в большинстве случаев заменяются роликовыми и петлевыми сушилками [19]. Реже применяются роликовые сушилки с горизонтальным движением ткани, имеющие меньшую производительность при тех же габаритных размерах. Для сушки трикотажных тканей, не допускающих вытяжки, для легких и тяжелых тканей—льняных, хлопчатобумажных, шелковых, часто применяются петлевые сушилки, которые не обладают сложностью роликовых сушилок, дешевы, весьма производительны и сохраняют ворсистость ткани; при достаточно интенсивной циркуляции по зонам, достигающей до 2 м/сек, и не значительном температурном перепаде по высоте весь выходящий материал имеет равномерное распределение влаги. Несмотря на наличие такой равномерности, некоторые заграничные заводы пытались получить изменение положения петли по отношению к шесту в течение процесса сушки, с тем чтобы исключить опасность недосыхания у шеста и внизу петли; попытки эти привели к созданию конструкций с вращающимися шестами, на которых петля получает небольшое смещение, и таким образом недосыхающие места попадают в лучшие условия омывания воздухом. Эти конструкции, вводя многочисленные новые детали, уничтожают ту простоту, которая так заманлива в петлевых сушилках; кроме того, вращение шестов не всегда дает равномерное смещение, а иногда даже ведет к спутыванию ткани [1, с.302].

Сушка натурального и искусственного шелка (муслина, креп-де-шина), особых сортов бархата и других тканей, которые чувствительны к механическому воздействию, к неравномерности сушки и т. д., производится в свободном состоянии на ленточном или роликовом транспортере при обдувке материала системой винтовых вентиляторов, расположенных сверху и снизу ткани. Материал проходит канал, передвигаясь по сушилке на ленточном транспортере. Обдувка воздухом происходит с двух сторон; сушилка работает по схеме с промежуточным подогревом и возвратом воздуха по зонам.

Искусственный шелк является наиболее чувствительным текстильным волокном, как в смысле допустимых температур, так и в смысле условий транспорта, обращения, чистоты и т. д. Различают четыре способа получения искусственного шелка, дающие материал с различными технологическими характеристиками: вискозный шелк (имеет более широкое распространение), медно-аммиачный, нитрошелк и ацетатный [1, с.299]. Сушка пряжи производится лишь для искусственного шелка и вискозного шелка [2].

Вискозное волокно проходит разные фазы сушки в зависимости от способа производства бобинного или центрифугального. При бобинном способе производства применяется две стадии сушки: первая сушка - волокна, получаемого из прядильной машины, вторая сушка - готовой пряжи в мотках после отбели, промывки и отжатия в центрифугах. При центрифугальном способе вместо первой сушки на бобинах происходит сушка шелка в мотках в натянутом состоянии без отжатия. Сбор хлопка происходит в течение нескольких месяцев и захватывает период наступления осенних дождей. Поэтому большинство сортов хлопка-сырца имеет повышенную влажность, ухудшающую процесс технологической обработки, который состоит в основном в раздавливании коробочки (курак), очистки волокна от частей коробочки и в отделении от волокна семени (джинирование) [1. с.302, 2].

Обычно первый сорт имеет наименьшую влажность, так как его сбор происходит в сухую погоду. Последующие сорта хлопка-сырца в зависимости от времени сбора и места произрастания имеют влажность, достигающую до 30 и даже 35%. Шестой сорт, или кусак, снимается вместе с коробочкой и перед сушкой ее необходимо отделить на ворохоочистительной машине. В процессе сушки влага удаляется как из волокон, так и из семян. Семена первого сорта идут на посев, а последующих сортов на хлопковое масло. Конечная влажность сырца, обеспечивающая нормальную производительность машин, соответствует 8 ~ 10%. Понижение конечной влажности до меньшего значения не дает существенных преимуществ при обработке. Максимально допустимая температура сушки для хлопка-сырца определяется для посевных сортов температурой семени, безопасной для его жизни; для остальных сортов эта температура определяется допустимым нагревом волокна, безопасным для прочности. Нагрев волокна и семени при одинаковых температурах агента сушки и при одинаковом снижении влажности может быть различным в зависимости от конструкции сушилки. Так, например, сушка с перемешиванием даст меньший нагрев продукта, чем сушка в неподвижном

слое, сушка во взвешенном состоянии даст меньший нагрев, чем сушка с перемешиванием [1, с.302].

Лабораторные опыты, проведенные сушильной лабораторией ВТИ при сушке в неподвижном слое, показали, что нагрев семени выше  $60^{\circ}\text{C}$  убивает жизнедеятельность зародыша, крепость волокна начинает падать при температуре волокна больше  $120^{\circ}\text{C}$ , хотя при большем  $100^{\circ}\text{C}$ , уже имеет место пожелтение; исходя из этого, нагрев волокна не следует допускать выше  $100^{\circ}\text{C}$  [1, с 302].

Длительность сушки хлопка-сырца в слое зависит от его начальной влажности, от толщины слоя, от степени перемешивания и главным образом от температуры сушки. Так, например, сушка в лабораторных условиях первого сорта от влажности 26% до 10% при высоте неподвижного слоя в 200 мм при  $t_1 = 60, 80, 100, 120^{\circ}\text{C}$  соответственно составляла 108, 70, 42 и 30 мин., а при слое 100 мм—70, 44, 27 и 18 мин., при слое 200 мм напряжения сетки по влаге составили = 2,43, 3,75, 6,2 и 8,8 кг/м<sup>2</sup> час влаги.

Сушка хлопка-сырца производится на многоленточных сушилках, работающих или по основному варианту сушильного процесса или по варианту с возвратом отработанных газов или воздуха, на башенных сушилках и на аэрофонтанных [1-4].

В многоленточных сушилках мы имеем сушку слоя с перемешиванием при ссыпании хлопка с ленты на ленту. За счет этого можно допустить температуру сушки несколько более высокую, чем при неподвижном слое. Обычно для непосевных сортов хлопка эта температура при входе в нижний ярус составляет  $100\div 120^{\circ}\text{C}$ . Напряжение 1 м<sup>2</sup> сетки у этих сушилок может доходить при этой температуре до  $2,7\div 3$  кг/м<sup>2</sup> час при сушке хлопка с влажности от 20 до 10%.

Расход тепла у сушилок составляет  $\sim 1400$  кал/кг влаги. Расход энергии зависит от сопротивления слоя и обычно составляет  $80\div 100$  кВт час/т влаги.

Сушилка башенного типа дает небольшой съем влаги, не превышающий 2,5% при температуре  $100^{\circ}\text{C}$  и до 0,7% при температурах сушильного агента  $140\div 150^{\circ}\text{C}$ . Эту сушилку можно применять только в тех районах, где не может иметь место поступление хлопка с влажностью, большей 18%. В башенных сушилках следует считать допустимой более высокую, чем у ленточных, температуру газов, например, для пятого сорта до  $140\div 150^{\circ}\text{C}$  [7,9].

В аэрофонтанной сушилке, примененной сушильной лабораторией ВТИ взамен ленточной и башенной, длительность сушки составляет несколько минут, при этом сушилка дает прекрасное распушение волокна, обеспечивающее быструю отдачу влаги, прекрасную очистку волокна от пыли и при малой длительности сушки допускает температуру агента до  $175^{\circ}\text{C}$  без ухудшения качества волокна [1-4].

Сушка хлопка-сырца может производиться горячим воздухом или дымовыми газами. Поскольку большинство хлопкоочистительных заводов не имеет котельных, особую актуальность приобретает второй метод сушки, учитывая особенно, что при аэрофонтанных сушилках мы можем применять

температуру до 175 °С, которая легко достигается здесь без применения дорогостоящих огневых калориферов [7-9].

Сушка хлопка-сырца в начале непрерывного процесса его переработки предназначена для снижения влажности хлопка-сырца до рекомендуемых технологическим регламентом значений, при достижении которых обеспечивается надежная и эффективная работа последующего очистительного оборудования. Поэтому сушка хлопка-сырца является одной из основных и необходимых операций технологического процесса.

Для сушки хлопка-сырца в настоящее время в основном применяется конвективный способ, при котором хлопок-сырец обдувается так называемым сушильным агентом, представляющим из себя нагретый атмосферный воздух или его смесь с продуктами сгорания в теплогенераторе природного газа или другого топлива. Конвективный способ применяется как в отечественных, так и в зарубежных установках для сушки хлопка-сырца [21,22].

Используемое в настоящее время на хлопкозаводах барабанные сушилки типа 2СБ-10 имеют существенные недостатки. Расход тепла сушильного агента непосредственно на сушку хлопка-сырца составляет всего 35-40%, остальное тепло, в основном, теряется на нагрев сушилки и с выбрасываемым в атмосферу отработавшим сушильным агентом, который загрязняет окружающую среду. При этом рециркуляция сушильного агента практически невозможна из-за его засоренности и влажности [22, с.4].

В сушилках 2СБ-10 самая большая потеря тепла 40-45% происходит с отработанным сушильным агентом. Чтобы уменьшить эти потери, было предпринято несколько попыток осуществить рециркуляцию отработанного сушильного агента путем его нагнетания через вентилятор в газопровод, что привело к ухудшению технологических показателей сушки и очистки хлопка-сырца. Это объясняется тем, что отработанный сушильный агент содержал выделенную из хлопка-сырца влагу, мелкий сор, пыль и свободное волокно. Попытка предварительной очистки отработанного сушильного агента также не удалась [2,7,8].

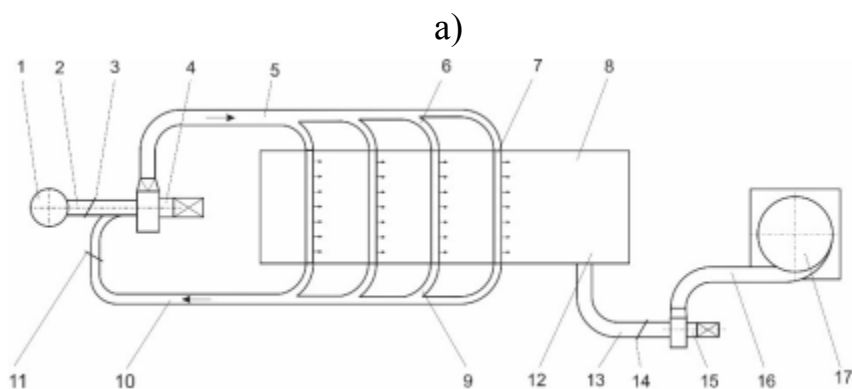
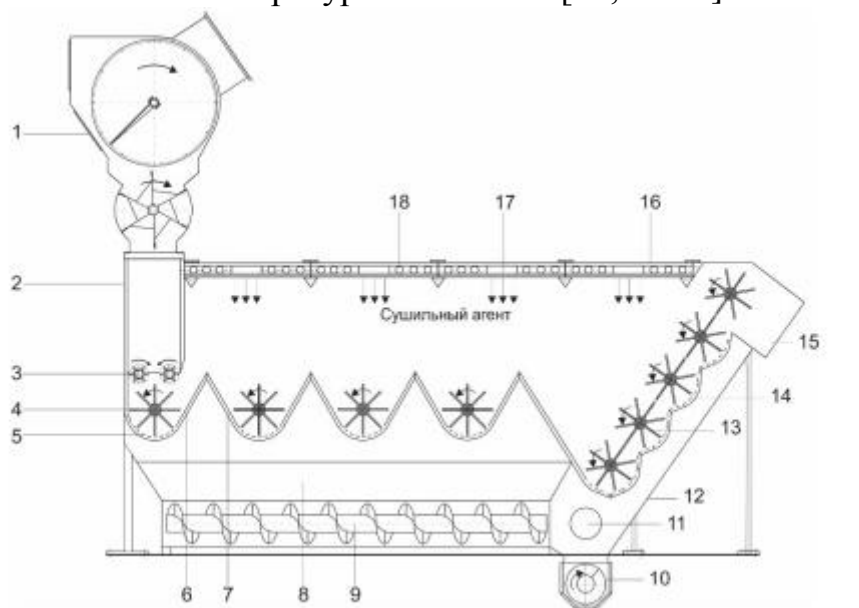
В барабанных сушилках время сушки составляет 5-8 мин, вследствие чего происходит сушка не только волокна, но и семян, что при включении сушилки в непрерывный процесс переработки хлопка-сырца нецелесообразно. В барабанах одновременно находится до 1,5 тонн хлопка-сырца, что осложняет ликвидацию пожаров. Эти сушилки морально и физически устарели [22, с.4].

В настоящее время в США успешно применяется технология, включающая предварительное рыхление хлопка-сырца, а затем его последовательную двукратно повторяющуюся и чередующуюся сушку в полочных сушилках и очистку в группах очистителей хлопка-сырца от мелкого и крупного сора. Такая технология взаимно усиливает сушку и очистку, так как разрыхленный и очищенный хлопок-сырец эффективнее сушится, а нагретый хлопок-сырец эффективнее очищается [4,22, с.5].

К сушилкам хлопка-сырца предъявляются следующие основные требования: при сушке хлопкосырца I, II и III сортов 1 и 2 классов с



влажностью до 15%, они должны обеспечивать надежную работу с производительностью до 10 т/ч и влагоотбор 3-5% при расходе сушильного агента 5,6 м<sup>3</sup>/сек и его температуре 130-150°С [12, с.185].



а- сушильно-очистительный агрегат, б- подача и рециркуляция сушильного агента в сушильно-очистительном агрегате

1-сепаратор, 2-шахта, 3-питающий валик, 4- рыхлительные барабаны, 5- перфорированные сетки, 6,7- наклонные и состыкованные друг с другом лотки, 8- отверстие в корпусе агрегата, 9-отводные патрубки, 11-корыто поперечного шнека, 12- наклонный лоток, 13- прутковые барабаны, 14- перфорированные сетки, 15- выгрузочное отверстие , 16- горизонтальные полые лотки, 17- щелевые отверстия, 18- трубчатый электрически нагреватель.

Рисунок 1.2- Сушильно-очистительный агрегат с системой рециркуляции сушильного агента

На основании анализа и вышеизложенных требований разработан сушильно-очистительный агрегат (рисунок 1.2), с рециркуляцией сушильного агента и аспирацией отработанного сушильного агента [22, с.5]. В агрегате будет осуществляться конвективная и контактная сушка, а также сушка инфракрасными лучами. При работе агрегата все его рабочие органы, узлы и

внутренние поверхности будут разогреты сушильным агентом, генерируемым в теплогенераторе и нагнетаемым дымососом через полые лотки в камеру агрегата, а полые лотки будут также дополнительно нагреваться установленными в них трубчатыми электрическими нагревателями (ТЭН) 18. При контактном движении по перфорированным сеткам, вдоль стенок и по наклонным лоткам хлопок-сырец будет нагреваться, то есть подвергаться контактной сушке. При взвешенном движении под воздействием прутковых барабанов и при полете до крыши агрегата хлопок-сырец будет обдуваться сушильным агентом, то есть подвергаться конвективной сушке [22, с.6].

Таким образом, в агрегате хлопок-сырец будет одновременно подвергаться контактному и конвективному способам сушки, что повысит его суммарную эффективность и компенсирует относительно короткое время пребывания хлопкового сырья под воздействием этих способов сушки [22, с.6].

### **1.3 Фильтрационный метод сушки и конструктивные решения**

#### **1.3.1 Разработки в области теории и практики фильтрационной сушки различных материалов**

Фильтрационный метод сушки заключается в фильтрации теплового агента сквозь пористую структуру материала и каналы, которые образуют частицы между собой под действием перепада давления над и под слоем материала. Фильтрационный метод высушивания имеет ряд преимуществ над другими методами, а именно: часть влаги удаляется механически (в некоторых материалах до 70% [23,24]), без затрат тепловой энергии на фазовое превращение влаги в пар, а тепловой агент омывает не только внешнюю поверхность высушиваемого материала, но и его внутреннюю структуру, вследствие чего поверхность тепло- и массообмена увеличивается [25]. Температура материала является максимальной на входе теплового агента и минимальной на выходе из слоя материала. Можно сделать вывод, что потенциал сушильного агента используется практически полностью, что, в свою очередь, интенсифицирует процесс сушки.

Значительный вклад в разработку теории и практики фильтрационной сушки различных материалов сделали ученые-профессора Чернявский А. И., Аксельруд Г. А., Ханик Я. М., Атаманюк В. М. и другие [26-36].

Профессором Хаником Я. М. [23] были разработаны научные основы фильтрационной сушки влажных листовых газопроницаемых материалов различных структурных модификаций и форм связи влаги и созданы установки для реализации процесса. Автором предложена классификация более сорока листовых газопроницаемых объектов, которая базируется на особенностях структурных модификаций, природе связи влаги с материалом и величине коэффициента проницаемости.

Исследована гидродинамика процесса во время движения газового потока через сухие газопроницаемые листовые материалы различной структурной модификации при создании перепада давления, как путем разрежения, так и создании избыточного давления. Автором выявлено, что зависимость

гидравлического сопротивления от скорости фильтрации имеет разный характер (парабола, линейная зависимость, кривая, обращена выпуклостью к оси ординат) и определяется величиной коэффициента проницаемости. Предложено двухчленное модифицированное уравнение для обобщения результатов гидродинамики при движении газового потока через сухой газопроницаемый объект, которое справедливо для больших коэффициентов проницаемости  $1,1 \cdot 10^{-11}$ . В случае меньших значений коэффициента проницаемости гидравлическое сопротивление предлагается определять зависимостью, которая учитывает изменение объема сушильного агента [23,37].

В работе [10,38] также изучена гидродинамика во время движения воздуха через опорные перфорированные перегородки и исследуемый материал по различным направлениям теплового агента. Установлено, что гидравлическое сопротивление системы материал-перфорированная перегородка влияет на живое сечение перфорации перегородки в пределах ее изменения 1 – 20%. В случае постоянного живого сечения перфорации гидравлическое сопротивление системы увеличивается с увеличением диаметров отверстий. Авторами создан метод расчета дифференциальной перфорации опорных поверхностей для выравнивания скорости фильтрации по всей поверхности объекта с неравномерной толщиной. Также исследована гидродинамика во время движения теплового агента сквозь влажный материал непосредственно в процессе сушки. Установлено, что гидравлическое сопротивление и скорость фильтрации теплового агента изменяются во времени и являются функциями не только структуры объекта, но и его влажности. А также исследовано влияние величины живого сечения перфорации и направления движения теплового агента на кинетику сушки газопроницаемых листовых материалов, которые расположены на опорной перегородке. Обоснован механизм процесса фильтрационной сушки, согласно которому концентрационный фронт водяного пара и влаги перемещается в направлении движения теплового агента, а часть, которая содержит высушенный материал, возрастает со временем. В работе исследован процесс одновременного формования и фильтрационной сушки изделий за счет избыточного давления. Разработан ряд конструкций сушильных агрегатов для фильтрационной сушки разностенных и равностенных листовых газопроницаемых материалов, а также объектов сложной формы [10,38].

Создана капиллярная модель, описывающая гидродинамику в процессе фильтрационной сушки. Установлено, что во время сушки капиллярно-пористых материалов равномерной грубопористой структуры процесс характеризуется наличием механического вытеснения влаги, механического выноса, постоянной скорости сушки и условного второго периода. В этом случае массообмен интенсифицируется в сотни раз по сравнению с конвективной сушкой при одновременном уменьшении энергетических затрат [31,32]. Установлено, что кинетика сушки капиллярно-пористых коллоидных материалов равномерной микропористой структуры характеризуется переменной во времени скоростью сушки, отсутствия периода механического вытеснения [38]. Также установлено, что в случае сушки материалов

неравномерной структуры имеет место период постоянной скорости, но механическое вытеснение не наблюдается. В сравнении с конвективной сушкой степень интенсификации для неравномерной структуры объекта несколько ниже, чем для материалов первых двух групп.

В работе [39] исследуется процесс фильтрационной сушки химического волокна. Автором исследована гидродинамика фильтрации теплового агента сквозь слой сухого химического волокна и получена математическая зависимость для расчета гидравлического сопротивления с учетом явления “усаживание” слоя во время приложения перепада давления. Получено уравнение для расчета изменения пористости слоя в зависимости от скорости фильтрования теплового агента и влажности материала. Изучена кинетика процесса в режиме непрерывной сушки и доказано негативное влияние на продолжительность процесса наличия различной влажности на поверхности материала. Проведен сравнительный анализ кинетики в режиме периодической и непрерывной сушки при различных скоростях фильтрования теплового агента на разных участках слоя. На основе обобщения экспериментальных и теоретических исследований гидродинамики и кинетики сушки предложен метод выравнивания скорости фильтрации теплового агента вдоль всей зоны сушки во время непрерывного процесса. Разработана методика расчета живого сечения перфорированной перегородки для выравнивания скорости фильтрации теплового агента. Создана математическая модель фильтрационной сушки химического волокна и выполнена ее экспериментальная проверка на адекватность. Предложена методика расчета аппарата фильтрационной сушки [40].

В работах [41-43] исследуется фильтрационная сушка кофейного шлама и цеолита. На основе экспериментальных исследований установлено влияние структуры, внутреннего строения отдельных частиц и физико-химических свойств материала на механизм фильтрационной сушки кофейного шлама и цеолита. Впервые изучена гидродинамика и кинетика процесса сушки кофейного шлама при переменной высоте слоя.

Получены гидродинамические характеристики слоя аморфных и кристаллических материалов на примере кофейного шлама и цеолита [42-44]. В частности для кофейного шлама, определены коэффициенты  $A$  и  $B$ , которые учитывают влияние вязкости и инерционных сил на величину гидравлического сопротивления соответственно. Также определен коэффициент проницаемости исследуемых материалов, что находится в пределах  $8,31 \cdot 10^{-10} \div 1,75 \cdot 10^{-9}$  для кофейного шлама и  $9,3 \cdot 10^{-14} \div 2,31 \cdot 10^{-13}$  для цеолита. Обоснованы различные подходы к обобщению результатов и получены расчетные зависимости, которые позволяют прогнозировать гидродинамика в процессе сушки кофейного шлама и цеолита. Изучена Кинетика фильтрационной сушки исследуемых дисперсных материалов, а также влияние на длительность процесса параметров сушки. Созданы расчетные зависимости кинетики сушки и определены кинетические коэффициенты для кофейного шлама  $a = 22,14 \frac{1}{m}$ ,

$\alpha = 1,7 \cdot 10^{-6} \cdot t^{0,97} \cdot \Delta P_c^{0,55}$  и цеолита  $a = 97,23 \frac{1}{M}$ ,  $\alpha = 1,5 \cdot 10^{-9} \cdot t^{0,99} \cdot \Delta P_c^{0,98}$ , что позволяет прогнозировать процесс в широком диапазоне изменения параметров, выполнена экспериментальная проверка на адекватность.

Экспериментально подтверждено, что сушка слоя кофейного шлама при послойном удалении сухого материала позволяет интенсифицировать процесс в 1,4 – 1,6 раза по сравнению с сушкой при стационарном слое. На основе полученных результатов разработана методика расчета сушильного агрегата с переменной высотой слоя и предложена схема конструкции промышленной сушилки, которая реализует непрерывный процесс фильтрационного сушки кофейного шлама. Установлено, что фильтрационный метод дает возможность интенсифицировать сушки кофейного шлама в 6 - 7 раз, цеолита в 16 - 17 раз по сравнению с конвективным методом [41-43].

В работе [45] на основе изучения существующих методов сушки дисперсных материалов автор показал, что одним из перспективных методов является сушка в стационарном слое, которое является более интенсивным, энергосберегающим, экологически безопасным по сравнению с конвективным. Результаты изучения гидродинамики полидисперсного слоя сухого угля показали, что доминирующее влияние на гидравлическое сопротивление имеют вязкостные силы, которые возрастают с увеличением условного диаметра частей. Полученная расчетная зависимость позволяет определить гидравлическое сопротивление слоя как отдельной фракции угля при известных значениях условного диаметра частей, так и полидисперсной смеси. Экспериментальные исследования кинетики сушки торфа и угля показали, что процесс происходит в первом и втором условных периодах [46].

Определены кинетические коэффициенты «а» и «а». Доказано, что коэффициент «а» зависит не только от природы материала, но и от его структуры. Определены показатели степеней и коэффициенты пропорциональности для расчета кинетического коэффициента «а» и впервые установлена их зависимость от условного диаметра частей. Получена расчетная зависимость для прогнозирования сушки в первом условном периоде. На основе результатов экспериментальных исследований определен относительный коэффициент сушки «х» для второго условного периода. Впервые установлено, что его значение зависит не только от природы материала, но и от фракционного состава. Установлена расчетная зависимость для прогнозирования сушки во втором условном периоде. Создана методика расчета сушильной установки для реализации сушки в стационарном слое и предложена его конструкция [45-47].

В работах [10,48] предложены уравнения для описания гидродинамики влажного и сухого слоев дисперсных материалов в достаточной степени коррелируются с теоретическими положениями и дают возможность прогнозировать потери давления процесса фильтрационной сушки, прогнозировать энергетические затраты. Установлено, что эквивалентный диаметр каналов имеет решающее влияние на потери давления. Общие потери давления в слое влажного материала являются аддитивными к потерям в зонах

влажного и сухого материала. Установлены пять этапов сушки фильтрационного отличаются между собой интенсивностью удаления влаги: I этап – механическое вытеснение; II этап – сушка в первом периоде; III этап – сушка в первом и втором периодах одновременно; IV этап – сокращение высоты фронта первого периода к нулю; V этап – сушка только во втором периоде. Определена теоретически минимальная высота слоя, на которой формируется фронт сушки в первом периоде, что зависит от интенсивности теплообмена между тепловым агентом и поверхностью дисперсного материала.

Разработанные методики и экспериментально определенные коэффициенты теплоотдачи и массоотдачи в зависимости от скорости движения теплового агента и гранулометрического состава различных материалов представленные в форме критериальных уравнений позволяют рассчитывать процесс сушки в первом периоде. Установленная аналогия между внешним теплообменом и массообменом в стационарном слое во время фильтрационной сушки позволяет определить коэффициент массоотдачи через коэффициент теплоотдачи. Разница между теплопереносом и массопереносом во втором периоде сушки заключается в том, что в теплопереносе участвует вся частица, а массоперенос водяного пара происходит в зоне между вращающейся поверхностью влаги в порах и капиллярах и внешней поверхностью твердой частицы [10,23].

Проанализированные выше работы показали, что исследованию динамики процесса тепло - и массообмена фильтрационной сушки уделялись только дисперсным материалам, а для материалов, имеющих волокнистое строение и неправильную форму, не уделялось. В этих работах, в основном, изучалась гидродинамика и кинетика фильтрационной сушки разного рода листовых газопроницаемых и дисперсных материалов. Необходимо заметить, что сушка дисперсных материалов, в большинстве случаев, осуществляется в условиях внешнего и смешанного тепломассообмена, поэтому определяющее влияние на ход процесса имеет гидродинамика.

### 1.3.2 Методы гидродинамического расчета при фильтрационной сушке

В технической гидравлике до сих пор отдают предпочтение уравнениям движения идеальной жидкости, дополняя его дополнительными членами и включая поправочные коэффициенты, учитывающие физические особенности реальных жидкостей. Исследованию потерь давления в стационарном слое дисперсного материала посвящен ряд научных работ и, как утверждают авторы, на потери давления в слое дисперсного материала, кроме физических параметров потока, физических и геометрических характеристик слоя оказывает влияние и скорость свободного витания отдельных частиц [39-43,48-52].

Гидродинамика движения воздуха сквозь слой высушиваемого материала в значительной мере определяет кинетику фильтрационной сушки влажного материала. Существует тесная связь между интенсивностью сушки и гидродинамикой процесса, потому что характер поля скоростей движения струек воздуха, омывающие отдельные частицы слоя, определяют режим

движения, который влияет на коэффициенты теплоотдачи и массоотдачи. Кроме этого, режим движения воздуха определяет толщину ламинарного пограничного слоя вокруг частицы, который лимитирует процесс как теплопередачи, так и массопереноса влаги [10, с.81].

Известно, что потери давления в слое дисперсного материала является функцией высоты слоя, его гранулометрического состава, формы частиц, которые образуют слой, структурного строения слоя, плотности и вязкости теплового агента. Движение газа через неподвижный слой высушиваемого материала в направлении "материал - перфорированная перегородка" характеризуется обтеканием отдельных частиц и движением в каналах между частицами. Поэтому различают внутреннюю, внешнюю и смешанную задачи гидродинамики. Для определения потерь давления в слое высушиваемого материала большинство авторов используют зависимость Дарси-Вейсбаха [53]:

$$\Delta P = \lambda_{сл} \cdot \frac{H_e}{d_e} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad (1.1)$$

где  $\lambda_{сл}$  – коэффициент сопротивления слоя;  $H_e$  - эквивалентная длина каналов, через которые движется газовый поток, м;  $d_e$  - эквивалентный диаметр, м ;  $\rho$  - плотность газового потока, кг/м<sup>3</sup>;  $v$  - действительная скорость движения среды, м/с.

Авторы [51-54] рекомендуют эквивалентную длину каналов определять из зависимости:

$$H_e = 1,5 \cdot H \quad (1.2)$$

где  $H$  – высота слоя высушиваемого материала, м.

Для определения коэффициента сопротивления  $\lambda_{сл}$  в технической литературе предлагается большое количество расчетных зависимостей, полученных путем обобщения экспериментальных результатов для различных по размерам и форме частиц, высот слоя и при различных режимах фильтрации газового потока. Анализ этих зависимостей, границы их применения и адекватность экспериментальных значений приведен в [51-55] и другой технической и научной литературе. В общем случае коэффициент трения  $\lambda_{сл}$  представляют как функцию числа Рейнольдса в виде:

$$\lambda_{сл} = \frac{A}{Re} + B \quad (1.3)$$

В зависимости от представления эквивалентного диаметра в уравнений (1.1) оценивается потери давления на основе внутренней или внешней задачи гидродинамики. Например, если эквивалентный диаметр представить как усредненный диаметр частиц полидисперсной смеси - это внешняя задача гидродинамики, а если как усредненный диаметр каналов, через которые фильтруется газовый поток - это внутренняя задача гидродинамики [10, с.82].

Например, если эквивалентный диаметр каналов, через которые движется газовый поток представляют в виде:

$$d_e = \frac{4 \cdot \varepsilon}{a} \quad (1.4)$$

то уравнение (1.1) переписывается в виде, которое называют двучленным уравнением Эргана:

$$\frac{\Delta P}{H_e \cdot v_0} = A \cdot \frac{\mu \cdot a^2}{32 \cdot \varepsilon^3} + B \cdot \frac{\rho \cdot a}{8 \cdot \varepsilon^3} \cdot v_0, \quad (1.5)$$

или представив усредненный диаметр каналов в виде:

$$d_e = \frac{2 \cdot d_q \cdot \Phi}{3} \cdot \frac{\varepsilon}{(1-\varepsilon)} \quad (1.6)$$

зависимость (1.1) переписывается в виде:

$$\frac{\Delta P}{H_e \cdot v_0} = A \cdot \frac{9 \cdot \mu}{8 \cdot (d_q \cdot \Phi)^2} \cdot \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} + B \cdot \frac{3 \cdot \rho}{4} \cdot \frac{1-\varepsilon}{d_q \cdot \Phi \cdot \varepsilon^3} \cdot v_0, \quad (1.7)$$

где  $\Delta P$  - потери давления в слое материала, кПа;  $v_0$  - фиктивная скорость фильтрования теплового агента, м/с;  $\varepsilon$  - пористость слоя, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $\mu$  - коэффициент динамической вязкости газового потока, Па·с;  $d_q$  - усредненный диаметр частиц, м;  $\Phi$  - фактор формы частицы неправильной формы.

В случае внешней задачи определяющим размером является усредненный диаметр частиц, которые формируют слой и тогда зависимость (1.1) представляют в виде:

$$\frac{\Delta P}{H_e \cdot v_0} = A \cdot \frac{\mu}{2 \cdot (d_q \cdot \Phi)^2 \cdot \varepsilon} + B \cdot \frac{\rho}{2 \cdot d_q \cdot \Phi \cdot \varepsilon^2} \cdot v_0 \quad (1.8)$$

Значения неизвестных коэффициентов «А» и «В» находят экспериментальным путем. Чтобы упростить задачу определения этих коэффициентов многие авторы не определяют непосредственно значение «А» и «В», а представляют зависимости (1.6), (1.8) и (1.9) в виде:

$$\frac{\Delta P}{H_e \cdot v_0} = A^* + B^* \cdot v_0 \quad (1.9)$$

и определяют «А\*» и «В\*».

На практике, в основном, используются зависимости (1.5) и (1.7) для расчета потерь давления в стационарном слое дисперсного материала [36-48, 56-63]. Необходимо заметить, что не имеет единого подхода определение гидравлического сопротивления слоя зернистого материала, который состоит из частиц разного размера, формы, строения, расположение в слое, а также при различных режимах движения газового потока через слой дисперсного материала. Однако, как утверждают авторы [51-54], на практике рекомендуется использовать полуэмпирическую зависимость Эргана, которая позволяет в широком диапазоне чисел Рейнольдса и усредненных диаметров частиц примерно рассчитать потери давления в слое дисперсного материала:



$$\frac{\Delta P}{H} = \frac{150 \cdot \mu \cdot v_0}{d_c^2} \cdot \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^2} + \frac{1,75 \cdot \rho \cdot v_0^2}{d_c} \cdot \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \quad (1.10)$$

Анализ уравнения (1.10) показывает, что в случае  $\frac{v_0 \cdot d_c \cdot \rho}{\mu \cdot (1-\varepsilon)}$  при малых значениях получаем уравнение Козени-Кармана, а при больших - Бурке-Пламмера [55].

Указанная зависимость справедлива для движения потока в направлении перфорированная перегородка - слой дисперсного материала (снизу - вверх).

Как свидетельствуют результаты экспериментальных исследований и результаты исследования гидродинамики фильтрационной сушки [10,23], использовать его для прогнозирования потерь давления при движении газового потока в полидисперсном слое материала, образованный частицами неправильной формы невозможно. Из-за того, что они имеют внутреннюю пористую структуру и погрешности между рассчитанными и экспериментальными значениями большие. К примеру, расчет потерь давления для слоя полиакриламида (частицы неправильной формы, которые имеют сквозные поры соразмерны с каналами между частицами в слое) высотой 40 мм и средним диаметром частиц 3,23 мм по формуле (1.10) дает погрешность по сравнению с экспериментальными значениями в пределах 52- 58%, для скоростей газового потока  $0,9 \leq v_0 \leq 1,5 \text{ м/с}$  и 46-54% для скоростей  $1,5 < v_0 \leq 6,0 \text{ м/с}$ , для слоя песка высотой 40 мм и средним размером частиц 0,24 мм 48-54%, гранулированного суперфосфата со средним размером частиц 2,62 мм – 36-42%, что в большинстве случаев неприемлемо для инженерных расчетов сушильного оборудования [63]. Данное расхождение объясняется тем, что, с одной стороны, перфорированная перегородка (в случае фильтрации газового потока снизу вверх) формирует поток и влияет на формирование поля скоростей в слое материала, с другой, на потери давления имеет также влияние скорость свободного падения отдельных мельчайших частиц, которые под действием воздушного потока могут изменять свое положение и соответственно структуру слоя. Еще одной причиной, и возможно наиболее существенной, является отсутствие единой методики определения усредненного диаметра частиц неправильной формы, трудность определения коэффициентов формы и взаимного экранирования, наличие непроточных зон для газового потока вследствие неравномерности структуры слоя дисперсного материала и его зависимость от перепада давлений.

Во время фильтрационной сушки поток теплового агента фильтруется в направлении "дисперсный материал - перфорированная перегородка". Известно [10,23], что в случае, когда живое сечение перфорированной перегородки является больше 30%, то потери давления в ней, по сравнению с потерями в дисперсном материале, является несколько незначительными, что ими можно пренебречь. Поэтому влиянием перфорированной перегородки на

формирование поля скоростей или потерями давления в перфорированной перегородке в первом приближении пренебрегают.

Во время фильтрации газового потока в направлении «дисперсный материал - перфорированная перегородка» поток формирует пористая структура дисперсного материала и вследствие того, что поток движется в направлении действия силы тяжести, слой остается стационарным при любой скорости. В случае, когда механические свойства отдельных частиц являются достаточно жесткими, только в зоне контакта дисперсного материала с перфорированной перегородкой образуется «переходная зона», в которой поток из отдельных каналов слоя «направляется» в отверстия перфорированной перегородки.

Для определения потери давления в слое сухого химического волокна, которому свойственно явление просаживания во время перепада давления, автор [10,39] предлагает систему уравнений

$$\begin{cases} \frac{\Delta P \cdot \varepsilon^3}{H_v \cdot v_0 \cdot (1 - \varepsilon)} = 1902420 + 133970 \cdot \frac{1}{1 - \varepsilon} \cdot v_0 \\ \varepsilon = \varepsilon_0 \cdot (1 - 5 \cdot 10^{-4} \cdot \varepsilon_0 \cdot v_0^3) \end{cases}, \quad (1.11)$$

где  $\varepsilon_0, \varepsilon$  – порозность слоя до приложения перепада давления и текущая порозность соответственно  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;  $H_v$  – высота слоя химического волокна с плотностью  $\rho_v = 1020 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

Первое уравнение построено на основе модифицированного уравнения Эргана, второе уравнение учитывает усаживание слоя химического волокна во время перепада давления и изменения пористости слоя во время фильтрации.

Потери давления в слое влажного материала определялись на основе вышеприведенной системы уравнений (1.11), но изменение порозности слоя в случае сушки влажного волокна определяли по формуле:

$$\varepsilon = 0,98 \cdot \varepsilon_0 \cdot (1 - 5 \cdot 10^{-4} \cdot \varepsilon_0 \cdot v_0^3) \cdot \frac{W \cdot G_c}{\rho_{H_2O} \cdot S \cdot H \cdot 100}, \quad (1.12)$$

где  $s$  – площадь поперечного сечения контейнера,  $\text{м}^2$ ;  $H$  – высота слоя химического волокна,  $\text{м}$ ;  $W$  – относительная влажность химического волокна выражена в %;  $G_c$  – вес сухого материала,  $\text{кг}$ ;  $\rho_{H_2O}$  – плотность воды,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

В общем случае движение газа между частицами зернистого слоя можно описать уравнением Навье - Стокса, но применить это уравнение для определения потерь давления в слое полидисперсного материала (который состоит из частиц различных по форме и геометрическим размерам и находится на перфорированной перегородке), практически невозможно. Это объясняется невозможностью сформулировать начальные и граничные условия, которые складываются во время обтекания отдельных частиц слоя. Однако, уравнения Навье-Стокса можно привести к безразмерному виду с помощью:

$$f(Eu, Re, Fr, Ho) = 0 \quad (1.13)$$

Данная зависимость отражает физическую и динамическую подобность потоков газа, а также их подобность во времени. Однако, на потери давления в слое зернистого материала влияет структура слоя зернистого материала и геометрические размеры аппарата. Поэтому для полного сходства уравнения (1.13) необходимо дополнить симплексом геометрического подобия  $\Gamma = H_e/d_e$  характеризующего структуру слоя зернистого материала и геометрические размеры аппарата:

$$f(Eu, Re, Fr, Ho, \Gamma) = 0 \quad (1.14)$$

Критерии  $Re$ ,  $Fr$ ,  $Ho$ ,  $\Gamma$  характеризуют условия однозначности гидравлической системы и их можно рассчитать. Только критерий Эйлера является следствием этого подобия, потому что в него входит такая величина как потеря давления  $\Delta P$ , значение которой зависит от физических свойств потока ( $\rho, \mu$ ), скорости движения  $v$ , структурных характеристик слоя ( $H, d_e, \varepsilon$ ) и геометрических параметров аппарата.

Поэтому зависимость (1.13) можно переписать в виде:

$$Eu = f(Re, Fr, Ho, \Gamma) \quad (1.15)$$

Количественное влияние перечисленных определяющих критериев на ход процесса различен. Принимая во внимание то, что в ходе исследования гидродинамики сухого слоя зернистого материала движение газа является установленным, то влиянием критерия гомохромности на гидродинамику можно пренебречь, а учитывая небольшую плотность воздуха, то и влияние силы тяжести на потери давления, а следовательно и критерием Фруда, также можно пренебречь, и зависимость (1.15) можно переписать в виде степенного уравнения:

$$Eu = A \cdot Re^x \cdot \Gamma^y \quad (1.16)$$

или

$$Eu = A \cdot Re^x \cdot \left(\frac{H_e}{d}\right)^y \quad (1.17)$$

Значение константы «А» и показателей степеней «х» и «у» определить теоретически невозможно Их находят путем обработки экспериментальных данных конкретных процессов. Анализ зависимости (1.17) показывает, что число Эйлера будет зависеть от высоты слоя. Чтобы исключить ее влияние эту зависимость представляют в виде [10, с.86]:

$$Eu \cdot \frac{d}{H_e} = f(Re) \quad (1.18)$$

Кроме этого, легко доказать на основе зависимости (1.1), что

$$Eu \cdot \frac{d}{H_e} = \frac{\lambda}{2} \quad (1.19)$$

и экспериментальные значения целесообразно представить в виде:

$$\lambda = f(\text{Re}) \quad (1.20)$$

Такое представление экспериментальных результатов в безразмерной форме позволяет непосредственно определить коэффициент гидравлического трения в стационарном слое дисперсного материала и пользуясь теорией подобия, определить масштабные коэффициенты в случае проектирования пилотной или промышленной установки фильтрационной сушки.

Аналогичные результаты для определения потерь давления в слое высушиваемого материала приведены в работах [45-47,60-63]. Определенные авторами неизвестные коэффициенты “А” и “В” дает возможность рассчитать потери давления в слое сухого материала при определенной скорости фильтрации теплового агента и высоты слоя. Однако, расчетные зависимости, которые приведены в этих работах, касаются конкретных материалов, поэтому применить их для слоя волокнистых материалов из-за большой погрешности между теоретически рассчитанными и экспериментально полученными.

### 1.3.3 Тепло - и массообмен при фильтрационной сушке

Интенсивность фильтрационной сушки в значительной степени зависит от количества теплоты, которая передается от теплового агента к влажной частице и определяется скоростью фильтрации теплового агента, разницей температур между поверхностью твердой частицы и газовым потоком, а также поверхностью межфазового контакта[10, с 168].

При фильтрационной сушке тепловой агент омывает поверхность влажной частицы, при этом происходит ряд процессов: теплообмен между тепловым агентом и поверхностью частицы, испарения влаги с поверхности материала (массоотдача), перемещение тепла внутри частицы (теплопередача), перемещение влаги внутри частицы (массоперенос). Влага в слое дисперсного материала находится между частицами, на их наружной поверхности, а также внутри частиц в трещинах, порах и капиллярах. Поэтому различают наружный и внутренний тепло - и массообмен. Во время сушки одновременно происходят следующие процессы: теплообмен, осложненный массообменом. Основные закономерности тепло - и массообмена во время сушки влажных материалов описаны в последующих работах [3,4,26,53,64-74].

Для определения усредненных коэффициентов теплоотдачи от теплового агента к слою сухих частиц через слой дисперсного материала на основе экспериментальных значений, рассчитывают значения коэффициентов теплоотдачи  $\alpha$  согласно уравнение теплоотдачи [74]:

$$\alpha = \frac{\Delta Q}{F \cdot (t - \bar{T}_n) \cdot \Delta \tau} \quad (1.21)$$

где  $\Delta Q$  - количество теплоты, передаваемой к слою и рассчитываемой согласно уравнению теплового баланса для теплового агента;  $t$  - среднеарифметическая температура теплового агента на входе и выходе из слоя,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $F$  - поверхность частиц,  $\text{м}^2$ .

Средняя температура  $\bar{T}_n$  поверхности твердых частиц оценивается из уравнения теплового баланса и определяется как средняя температура  $\bar{T}$  частиц:

$$\Delta Q = m \cdot c_s \cdot (\bar{T} - T_0), \quad (1.22)$$

где  $m$  – масса частиц в слое, кг;  $c_s$  – теплоемкость материала, ;  $\bar{T}$  – средняя температура частиц слоя, К;  $T_0$  – начальная температура частицы, К.

Как известно [66], теплота от теплового агента к влажному материалу передается тремя путями: конвективно, теплопроводностью и излучением. В процессе фильтрационной сушки тепло от теплового агента к влажной частице передается конвективно, тогда уравнение теплообмена в стационарных условиях можно записать в виде закона Ньютона-Рихмана [75].

На практике для описания передачи теплоты от газового потока частиц влажного материала используется система дифференциальных уравнений, и для обобщения результатов используют теорию подобия. В общем виде критериальное уравнение для случая вынужденного обтекания влажной поверхности тепловым агентом имеет вид:

$$Nu = 2 + A \cdot Re^n \cdot Pr^{0,33} \cdot Gu^m, \quad (1.23)$$

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

$Gu = \frac{t - t_{m.m.}}{t}$  – критерий Гухмана;

$Pr = \frac{\nu}{a}$  – число Прандтля;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости,  $m^2/c$ ;  $\alpha$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  $t, t_{m.m.}$  – температура теплового агента и мокрого термометра, °C;  $A, n, m$  – неизвестные коэффициенты, которые зависят от режима движения теплового агента и определяются экспериментальным путем.

Во время обобщения гидродинамики за основной линейный размер обычно принимают эквивалентный диаметр  $d_e$  каналов, через которые фильтруется тепловой агент. При анализе процессов теплообмена и массообмена используется этот же линейный размер, который является наиболее характерным для процессов в стационарном слое материалов.

Учитывая то, что физические параметры воздуха изменяются в узком диапазоне, согласно рекомендациям [76] принимается  $Nu \sim Pr^{0,33}$ . Для определения неизвестных коэффициентов "А" и "n" экспериментальные значения представляются зависимостью  $\frac{Nu}{Pr^{0,33}} = f(Re)$  в логарифмической системе координат.

Экспериментальные данные для всех материалов аппроксимируются параллельными прямыми, это означает, что показатель степени у числа Рейнольдса будет одинаковым для всех исследуемых материалов.

Расположение прямых линий по вертикали указывает на влияние гранулометрического состава материала на коэффициент теплоотдачи. Число Нуссельта зависит от режима фильтрации теплового агента и размеров частиц материала [77, 78].

Значение коэффициента "А" зависит от геометрических размеров частиц, а показатель степени "n" является постоянным и равным 0,9. Поэтому для обобщения экспериментальных значений, аналогично как и для обобщения гидродинамики фильтрационной сушки, в критериальное уравнение (1.24)

целесообразно ввести геометрический симплекс  $\frac{d_{ч.}}{D_a}$  чтобы учесть влияние

геометрических размеров частиц и контейнера на процесс теплообмена [10, с.177].

Если экспериментальные данные аппроксимировать несколькими результатами, то показатель степени является одинаковым и равняется  $n = 0,67$ , а коэффициент "А" для различных материалов будет различным в зависимости от геометрического симплекса и его можно аппроксимировать степенными зависимостями вида:

$$A = A' \cdot \left( \frac{d_{ч.}}{D_a} \right)^n \quad (1.24)$$

тогда зависимость (1.23) можно записать для различных дисперсных материалов в виде:

$$Nu = 1,0 \cdot Re^{0,9} \cdot Pr^{0,33} \cdot \left( \frac{d_{ч.}}{D_a} \right)^{0,67} \quad (1.25)$$

-для слоя влажного угля:

$$Nu = 1,2 \cdot Re^{0,9} \cdot Pr^{0,33} \cdot \left( \frac{d_{ч.}}{D_a} \right)^{0,67} \quad (1.26)$$

-для полиакриламида, технического углерода, суперфосфата, аммофоса и крупнозернистого песка:

$$Nu = 2,0 \cdot Re^{0,9} \cdot Pr^{0,33} \cdot \left( \frac{d_{ч.}}{D_a} \right)^{0,67} \quad (1.27)$$

Причины такого расхождения между различными мелкодисперсными материалами, объясняется различной формой частиц и шероховатостью их внешней поверхности, поэтому условия обтекания поверхности частиц для различных материалов будут разными, также необходимо учитывать взаимное экранирование частиц друг друга, которое для разных материалов будет разным, и как следствие, часть поверхности не омывается тепловым агентом и участия в теплообмене не принимает. Определить коэффициент взаимного

экранирования частиц торфа или кофейного шлама экспериментально (например, как для угля) является невозможным из-за хрупкости частиц [10, с.179].

Аналогично, как и для сухих дисперсных материалов обобщения для влажных дисперсных материалов проводятся по уравнению (1.23), представив экспериментальные данные зависимости  $\frac{Nu}{Pr^{0,33}} = f(Re)$  в логарифмической системе координат, что позволило определить неизвестные коэффициенты "А" и "n".

В литературе [50,61,67-70] приведено большое количество критериальных уравнений, в которых определены коэффициенты  $A, n, m$ , однако использование их для слоя волокнистых материалов является невозможным, поэтому такие коэффициенты определяются экспериментальным путем.

Коэффициент массоотдачи  $\beta$  является одним из основных кинетических коэффициентов, которые позволяют рассчитать скорость массопередачи. Уравнения для определения коэффициента массоотдачи  $\beta$  приведены в работе [50] в случае вынужденного движения теплового агента вдоль влажной поверхности:

$$Sh = 2 + A' \cdot Re^{n'} \cdot Sc^{0,33} \cdot Gu^{m'}, \quad (1.28)$$

где  $Sh = \frac{\beta \cdot d}{D}$  – критерий Шервуда;  $A', n', m'$  – неизвестные коэффициенты, определяемые экспериментальным путем.

Аналогично, как и для теплообмена, учитывая то, что физические параметры теплового агента менялись в течение эксперимента незначительно, согласно рекомендациям [80] можно принять, что  $Sh \sim Sc^{0,33}$ .

Неизвестные значения коэффициентов  $A, n, m$  определяются из графической зависимости  $\frac{Sh}{Sc^{0,33}} = f(Re)$ , полученной на основе экспериментальных данных.

Аналогично, как и для теплообмена, аппроксимирующие линии параллельны между собой. Гранулометрический состав дисперсных материалов также влияет на процесс массообмена, о чем свидетельствуют различные значения  $Sh/Sc^{0,33}$  при одинаковом значении числа Рейнольдса. Кроме размеров гранул, на процесс массообмена влияет и шероховатость поверхности частиц и их внутреннее строение. Торф и кофейный шлам имеют отклонения по их расположению на графической зависимости-это можно объяснить разностью структурного строения этих частиц, а также сложностью определить их эквивалентный диаметр, который бы адекватно описывал теплообменные и массообменные свойства слоя.

Обобщение экспериментальных значений позволило представить зависимость (1.28) для определения коэффициента массоотдачи в тонком слое

дисперсных материалов с учетом геометрических параметров слоя и аппарата в виде:

- для слоя влажного угля, песка среднезернистого и крупнозернистого:

$$Sh = 1,62 \cdot Re^{0,9} \cdot Sc^{0,33} \cdot \left( \frac{d_{\text{ч.}}}{D_a} \right)^{0,67} \quad (1.29)$$

- для слоя влажного угля фракции:

$$Sh = 1,3 \cdot Re^{0,9} \cdot Sc^{0,33} \cdot \left( \frac{d_{\text{ч.}}}{D_a} \right)^{0,67} \quad (1.30)$$

- для слоя влажного технического углерода, аммофоса и суперфосфата:

$$Sh = 0,7 \cdot Re^{0,9} \cdot Sc^{0,33} \cdot \left( \frac{d_{\text{ч.}}}{D_a} \right)^{0,67} \quad (1.31)$$

Известно [52], что коэффициент молекулярной диффузии зависит от режима обтекания твердых частиц тепловым агентом. Метод определения коэффициента внутренней диффузии базируется на математическом решении дифференциального уравнения внутренней диффузии. В работе [10, с.73] приведены коэффициенты внутренней диффузии для трехмерной модели. Для частиц шарообразной формы это уравнение в сферических координатах:

$$\frac{\partial w^c}{\partial \tau} = D_w \cdot \left( \frac{\partial^2 w^c}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial w^c}{\partial r} \right) \quad (1.32)$$

Но использовать данную зависимость для расчета коэффициента внутренней диффузии для частиц волокнистых материалов невозможно.

При фильтрационной сушке в первом периоде происходит одновременно передача тепла от теплового агента к поверхности высушиваемого материала и передача влаги с поверхности частиц к теплому агенту. Оба процесса относятся к конвективным: конвективный теплообмен и конвективный массообмен. Характерным для обоих процессов является зависимость плотности потока тепла или массы от поверхности высушиваемого материала, разницы температур или концентраций (влажностенности). Оба процесса характеризуются через коэффициенты теплоотдачи  $\alpha$  и массоотдачи  $\beta$ . Наибольшее влияние на их значение имеет гидродинамика, которая, как было сказано, оценивается числом  $Re$ . Из приведенных зависимостей (1.25) - (1.27) видно, что для обоих случаев уравнения в обобщенных переменных подобные между собой и характеризуются одинаковыми показателями степени у числа Рейнольдса, которое указывает на одинаковое влияние гидродинамики на коэффициенты теплоотдачи и массоотдачи. 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.

С целью определения аналогий, между этими процессами приравнивая эти комплексы между собой:

$$\frac{Nu}{Pr^{0,33}} = \frac{Sh}{Sc^{0,33}} \quad (1.33)$$

или

$$\frac{\alpha \cdot d_e}{\lambda \cdot \left(\frac{\nu}{a}\right)^{0,33}} = \frac{\beta \cdot d_e}{D \cdot \left(\frac{\nu}{D}\right)^{0,33}} \quad (1.34)$$

откуда можно получить:

$$\frac{\alpha}{c \cdot \rho} = \beta \cdot \left(\frac{a}{D}\right)^{0,67} \quad (1.35)$$

Учитывая, что  $\frac{D}{a} = Le$  – число Льюиса, вышеприведенную зависимость можно представить в виде:

$$\beta = \frac{\alpha}{c \cdot \rho} \cdot Le^{\frac{2}{3}} \quad (1.36)$$

С этого следует, что для первого периода фильтрационной сушки можно определить коэффициент массоотдачи  $\beta$ , если известен коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  [81].

Таким образом, проведен анализ работы сушильных аппаратов использующих принцип фильтрации воздуха сквозь слой высушиваемого материала, а также расчетных уравнений для определения их основных характеристик, таких как гидродинамические показатели, массообмен, теплообмен.

#### 1.4 Постановка задач исследований

При любом масштабе использования сушильных технологий принципиальной представляется реализация ряда технико-экономических параметров, таких как минимально возможная энергоемкость процесса, максимальная однородность сушки, минимальное время выхода на заданную влажность и некоторых других характеристик обезвоживания. Эти параметры могут быть обеспечены грамотным подходом к выбору наиболее подходящих к данной конкретной ситуации базовых физических процессов, приводящих к обезвоживанию продуктов, соответствующих им технологий сушки и, наконец, за счет создания оборудования, на котором указанные процессы и технологии могут быть реализованы.

Для реализации процесса сушки хлопка сырца в промышленности используют сушилки барабанного типа и сушилки кипящего слоя, которые являются энергозатратными и дорогими. Поэтому стоит задача разработать новый тип сушилки, который позволит снизить энергетические затраты на процесс сушки хлопка-сырца.

Влага в органических материалах волокнистой структуры размещена в основном внутри и частично на поверхности. Во время сушки влага испаряется за счет подвода теплоты, а движущей силой процесса является разность температур между тепловым агентом и частицами материала.

Наличие или отсутствие механического вытеснения определяется наличием свободной влаги, которая содержится силами поверхностного натяжения между частицами, которые формируют слой и технологии обработки органических материалов волокнистой структуры. Интенсивность механического вытеснения определяется перепадом давления и количеством свободной влаги. Чем больше перепад давления, тем меньше каналов, образованных частицами слоя, соответственно меньше будет удалена свободная влага. Конечно, максимальное количество влаги, которую можно удалить, определяется свободным объемом и структурным строением материалов волокнистой структуры, которые определяют количество влаги, содержащееся в материале.

Одним из высокоинтенсивных методов удаления как свободной, так и связанной влаги является фильтрационная сушка. Это обусловлено тем, что во время фильтрационной сушки тепловой агент фильтруется сквозь пористую структуру влажного материала, который размещен на перфорированной перегородке в направлении «влажный материал–перфорированная перегородка». Скорость движения теплового агента в порах и каналах стационарного слоя влажного материала определяет толщину пограничного слоя (гидродинамического, теплового и диффузионного) и соответственно значения коэффициентов тепло - и массообмена. Кроме этого поверхностью тепло - и массообмена является суммарная поверхность пор и каналов сквозь которые фильтруется тепловой агент.

Скорость фильтрации теплового агента определяют исходя из технико-экономических соображений, учитывая то, что ее увеличение влияет на рост потери давления. Причем, действительная скорость движения теплового агента относительно элементов слоя значительно выше, чем в случае сушки любыми другими методами (в кипящем слое, во время сушки в пневмотранспортных сушилках и др). Большие поверхности тепло - и массообмена и скорость теплового агента в порах и каналах стационарного слоя влажного материала обеспечивают высокие коэффициенты тепло - и массообмена и соответственно интенсивность фильтрационной сушки.

Проанализированные выше работы показали, что исследованию динамики процесса тепло - и массообмена фильтрационной сушки уделялись только дисперсным материалам, а для материалов, имеющих волокнистое строение, не уделялось. В этих работах, в основном, изучалась гидродинамика и кинетика

фильтрационной сушки разного рода листовых газопроницаемых и дисперсных материалов. Необходимо заметить, что сушка дисперсных материалов, в большинстве случаев, осуществляется в условиях внешнего и смешанного теплообмена, поэтому определяющее влияние на ход процесса имеет гидродинамика.

Обобщение результатов экспериментальных и теоретических исследований гидродинамики и тепло - и массообмена при фильтрационной сушке органических материалов волокнистой структуры, позволили предложить конструкцию сушильной установки, которая учитывает физико-механические свойства хлопка-сырца и его стеблей, усовершенствовать методику расчета основных конструктивных размеров данной установки и рассчитать оптимальные технологические параметры теплового агента. Исследования таких аппаратов в настоящее время отсутствуют.

Анализ литературных источников позволил определить основные направления исследований процесса фильтрационной сушки волокнистых материалов. К этим направлениям относятся теоретические и экспериментальные исследования внешнего и внутреннего теплообмена и кинетики массообмена.

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

- изучение механизма фильтрационной сушки волокнистых материалов и взаимодействия теплового агента с влагой находящейся в порах волокон с помощью визуального наблюдения и статистической обработки фотографий структуры слоя;
- получение расчетных зависимостей для определения удельной поверхности слоя волокон хлопка сырца, их объемной порозности, а также эквивалентного диаметра;
- экспериментальное исследование фильтрации теплового агента сквозь стационарный слой волокон хлопка при различном насыпном весе и различных высотах слоя с точки зрения внутренней задачи гидродинамики;
- получение расчетных зависимостей для определения потери давления в пористом стационарном слое при фильтрации потока с учетом удельной поверхности слоя волокон хлопка сырца, их объемной порозности, а также эквивалентного диаметра;
- экспериментальное исследование кинетики процесса сушки при фильтрации теплового агента сквозь стационарный слой волокон хлопка при различном насыпном весе и различных высотах слоя;
- экспериментальное определение коэффициентов теплоотдачи и массоотдачи в зависимости от скорости движения теплового агента через слой волокон хлопка сырца при фильтрационной сушке и получение расчетных зависимостей;
- разработка научно-обоснованной инженерной методики расчета фильтрационной сушильной установки для сушки волокнистых материалов и рекомендаций по проектированию и эксплуатации;
- промышленная апробация результатов исследования.

## **2 ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА И МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ ИССЛЕДУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ**

### **2.1 Определение основных теплофизических параметров процесса сушки и физико-химических свойств хлопка –сырца**

Объектом исследований в качестве волокнистых материалов мы выбрали хлопок –сырец, который является широко распространенным продуктом сельского хозяйства в Южных регионах Республики Казахстан [5,11].

Известно, что [7] при хранении хлопка-сырца с влажностью более 13—14% и температуре окружающей среды выше 12—14<sup>0</sup>С температура его повышается до 60—70<sup>0</sup>С и выше, в семенах происходят биологические процессы. Это может привести к полной потере текстильных качеств волокна, к порче семян как посевного материала и потере их масличности при переработке на маслобойных заводах[11,12] .

При очистке и волокноотделении хлопка-сырца повышенной влажности снижается производительность оборудования (из-за забоев сепараторов, винтовых конвейеров, очистителей и колосниковых решеток джинов).

При повышении влажности снижается и упругость волокна, а сцепляемость с сорными примесями усиливается, вследствие чего при механическом воздействии оно легко деформируется. Это приводит к образованию в волокне мягких пороков и снижению очистительного эффекта при волокноотделении и волокноочистке по сору и улюку. В результате волокно, полученное из такого хлопка, имеет неудовлетворительный товарный вид. Нормы кондиционной влажности устанавливаются из условий обеспечения длительной сохранности хлопка-сырца в хранилищах и бунтах, а нормы технологической влажности — из условий наиболее эффективного протекания технологического процесса, при котором достигается наилучшая очистка хлопка-сырца и волокна от сорных примесей, а волокноотделение и волокноочистка происходят с высокой производительностью и выпуском волокна с наименьшим содержанием пороков [12].

Технологическая влажность хлопка-сырца для первых сортов составляет 7—8%. Высушивать хлопок-сырец до влажности ниже 7% регламентированным технологическим процессом переработки хлопка-сырца не рекомендуется [7,11,12].

Чтобы не допустить порчи хлопка-сырца при хранении, необходимо довести его влажность с помощью естественной или искусственной сушки до кондиционной, а чтобы обеспечить выпуск волокна высокого качества, хлопок-сырец при его очистке и волокноотделении следует подсушивать до технологической влажности.

Хлопок-сырец—многокомпонентный материал, состоит он из хлопкового волокна и семян. Волокно содержит в основном целлюлозу, небольшое количество пектиновых веществ и восковое покрытие. Семена состоят из ядра и кожуры. Все эти компоненты имеют различное геометрическое и химическое строение, что оказывает большое влияние на протекание в них

влагопоглощающих из окружающей среды — сорбционных и влагоотдающих в окружающую среду — десорбционных процессов [11,12].

Искусственную сушку хлопка-сырца производят в сушильных установках. При сушке изменяется масса хлопка-сырца  $m$ , его влажность  $\omega$  и температура  $t_M$ . Теплота передается высушиваемому хлопку-сырцу с помощью газообразного теплоносителя, получающую теплоту от внешнего источника. В зависимости от направления движения теплоносителя и хлопка-сырца в сушилке различают: прямоток, когда теплоноситель и хлопок-сырец идут в одном направлении, и противоток, когда теплоноситель и хлопок-сырец идут в противоположных направлениях [76].

Состояние теплоносителя в различных частях сушилки характеризуется величинами: температурой  $t$ , относительной влажностью  $\varphi$ , влагосодержанием  $\alpha$  и теплосодержанием  $J$  [2,8].

Качество сушильного процесса и работа сушилки оценивается такими показателями, как влагоотбор, производительность по влаге и влажному хлопку-сырцу, равномерность сушки, очистительный эффект, расход тепла на килограмм испаренной влаги [77].

Влагоотбор показывает, какое количество влаги испарилось в сушилке в процентах к массе абсолютно сухого хлопка-сырца. Определяется он по формуле [2,26]:

$$\Delta W = \frac{m_1 - m_2}{m_{\text{сух}}} \cdot 100\% \quad , \quad (2.1)$$

где  $m_1$  — масса хлопка-сырца поступившего в сушилку, кг;

$m_2$  — масса высушенного хлопка-сырца, кг;

$m_{\text{сух}}$  — масса абсолютно сухого хлопка-сырца, кг.

$$m_{\text{сух}} = m_1 \frac{100}{100 + W_1} = m_2 \frac{100}{100 + W_2} \quad , \quad (2.2)$$

где  $W_1, W_2$  — начальная и конечная влажность хлопка-сырца, %.

Количество испаренной влаги в хлопковой сушилке:

$$m = m_1 - m_2 \quad . \quad (2.3)$$

Производительность сушилки по влажному хлопку-сырцу:

$$m_1 = \frac{m(100 + W_1)}{100 + W_2} \quad (2.4)$$

*Равномерность сушки.* Одним из важных критериев оценки работы сушилки и качества сушильного процесса — равномерность сушки. Неравномерно высушенный хлопок-сырец сорбирует влагу из окружающего воздуха и при длительном хранении может подвергнуться локальному самосогреванию и порче [11,12].

За критерий равномерности сушки принимается устанавливающееся в естественных условиях соотношение равновесной влажности между компонентами хлопка-сырца [2].

Равномерность сушки волокна, ядра семени и кожуры по отношению к влажности высушенного хлопка-сырца определяется коэффициентами  $\eta_{\text{в}}, \eta_{\text{я}}, \eta_{\text{к}}$ .

Равномерность сушки составит:

для волокна:

$$\eta_{\text{в}} = \frac{W_{\text{в}}}{0,7\omega_2}, \quad (2.5)$$

для ядра семени:

$$\eta_{\text{я}} = \frac{W_{\text{я}}}{0,46W_2^{1,275}} \quad (2.6)$$

для кожуры:

$$\eta_{\text{к}} = \frac{W_{\text{к}}(1-p_{\text{в}}-p_{\text{я}})}{W_2-p_{\text{в}}W_{\text{в}}-p_{\text{я}}W_{\text{я}}} \quad (2.7)$$

Равномерность сушки считается удовлетворительной, если коэффициенты, вычисленные по формулам (2.5), (2.6) и (2.7), приближаются к единице [2].

Сушка хлопка-сырца непосредственно продуктами сгорания при сжигании каменного угля, тяжелых видов жидкого топлива или отходов очистительных машин оказалась неприемлемой, так как в этом случае волокно может покрыться копотью, что ограничит его использование в текстильной промышленности. Эти виды топлива можно применять только в том случае, если теплоноситель — атмосферный воздух—нагревать в гладкотрубных стальных воздухонагревателях, работающих на дымовых газах [8].

Исходя из требований сохранения природных качеств волокна и семян, достаточно высушить хлопок-сырец до его кондиционной влажности регламентированным технологическим процессом [7].

Первичной обработки хлопка допускается при приемке и укладке его на хранение высушивать в сушильно-очистительных цехах на хлопкозаготовительных пунктах следующим образом:

1, 2, 3 сорта – до влажности не выше 11%, 4 сорт – до влажности не выше 13%. При этом имеется ввиду, что перед пуском в обработку хлопок–сырец еще будет подсушиваться в заводских сушильно-очистительных цехах до технологической влажности  $W = 7-8\%$ .

Таблица 2.1-Допускаемая температура в зависимости от влажности хлопка-сырца и типа сушилки, °С[7].

Влажность хлопка-сырца, %	Допускаемая температура в прямоточной сушилке, °С	Допускаемая температура в противоточной сушилке, °С
До 9	90-130	80-100
10-11	140-150	110-120
12-14	160-200	130-160
15-18	210-250	170-200
Более 18	250	200

Сушка хлопка-сырца, влажность которого выше 20%, производится дважды. Подсушка хлопка-сырца с влажностью 8% и менее не производится, если относительная влажность воздуха ниже 60%. Температура теплоносителя при сушке хлопка-сырца устанавливается в зависимости от влажности хлопка-сырца перед пуском в сушилку и от конструкции сушилок (таблица 2.1).

Подсушка семенного хлопка-сырца средневолокнистых сортов до влажности  $\omega = 7\text{—}8\%$  производится в прямоточных сушилках, включенных в непрерывный технологический процесс с температурой теплоносителя не выше  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  и температурой нагрева семян не выше  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Превышение указанной температуры нагрева посевных семян может снизить их всхожесть. Не допускается нагрев семян технического хлопка-сырца выше  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ , так как это уменьшит выход растительного масла, и нагрев волокна выше  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что может привести к потере волокном текстильных качеств.

Температура нагрева хлопка-сырца зависит от его влажности и времени сушки. Во избежание пересушивания, вследствие чего температура может подняться выше допустимой, время нахождения хлопка-сырца в сушилке должно регулироваться. При очень высокой температуре теплоносителя (выше  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) хлопок-сырец быстро перегревается, влага полностью удаляется, волокно разлагается, образуя газообразные продукты сухой перегонки. Поэтому время сушки и температура теплоносителя выбираются такими, чтобы хлопок-сырец и его компоненты не перегревались. Компонентами хлопка-сырца являются его волокно, семена, кожуру и ядра семян.

Наиболее эффективным способом сушки является конвективный способ. Процесс сушки хлопка-сырца этим способом требует знания его удельной изобарной теплоемкости, а также удельной изобарной теплоемкости семян, коэффициента теплопроводности кожуры и коэффициента температуропроводности ядра [78].

В работе [79] представлены результаты измерения удельной изобарной теплоемкости  $C_p$ , коэффициентов температуропроводности  $\lambda$  и температуропроводности  $\alpha$  хлопка-сырца тонковолокнистого хлопчатника и обсуждается вопрос о возможности применения этих результатов в технологическом процессе сушки хлопка-сырца.

В измерительных ячейках при измерении теплофизических параметров компонентов хлопка-сырца помимо компонента содержится воздух. Следовательно, надо измерить эффективный теплофизический параметр двухкомпонентной системы. Хлопок-сырец в этом смысле представляет собой четырехкомпонентную систему. Если же до проведения измерений прессовать компоненту под высоким давлением, чтобы избавиться от воздуха, то нарушится структура компонентов и это приведет к искажению результатов. Следовательно, надо искать неразрушающие способы определения истинных теплофизических параметров. Вероятнее всего истинные значения теплофизических параметров удастся определить, исследуя экспериментально зависимость этих параметров от пористости материала  $m_2 = \frac{V_2}{V}$  ( $V$  – объем измерительной ячейки,  $V_2$  – объем воздуха в порах между материалом компонента) в некотором интервале пористости и экстраполируя результаты к  $m_2 = 0$ . В экспериментах проводят такую утрамбовку компонентов в ячейке, при которой еще не нарушается их структура. Перед началом эксперимента определяют массы компонентов при такой упаковке и при всех измерениях закладываются в ячейку такое количество материала. Соответствующую

пористость материала теперь можно легко определить, если спрессовать компоненту в форме прямоугольного параллелепипеда или цилиндра, затем найти его истинный (собственный) объем[80].

Таблица 2.2- Температурные зависимости эффективных удельной изобарной теплоемкости  $C_p$  (Дж/(кг · К)), коэффициента теплопроводности  $\lambda$  (Вт/(м · К)) и коэффициента температуропроводности  $\alpha$  ( $10^{-3}$  м<sup>2</sup>/ч) хлопка-сырца и его компонентов[79].

	Т,К	Хлопок-сырец	Волокно	Семена	Ядро семян	Кожура семян
$C_p$ , (Дж/(кг·К)),	298	985,1	1441,1	854,6	482,6	844,5
	323	1187,3	1532,9	881,2	568,2	865,6
	348	1374,9	1645,8	930,1	671,5	919,3
	373	1618,5	1787,0	1065,1	761,6	1062,4
	398	1795,0	1998,7	1354,7	918,22	1275,6
	423	1899,5	2314,6	1602,15	1348,6	1524,6
$\lambda$ , (Вт/(м·К))	298	0,044	0,045	0,386	0,307	0,263
	323	0,054	0,052	0,398	0,324	0,279
	348	0,081	0,062	0,421	0,362	0,303
	373	0,105	0,077	0,451	0,414	0,331
	398	0,136	0,098	0,506	0,476	0,381
	423	0,158	0,110	0,577	0,564	0,456
$\alpha$ , ( $\cdot 10^{-3}$ м <sup>2</sup> /ч)	298	0,418	0,070	0,498	0,307	0,416
	323	0,429	0,073	0,560	0,329	0,432
	348	0,451	0,076	0,632	0,362	0,451
	373	0,476	0,079	0,719	0,41	0,476
	398	0,506	0,083	0,813	0,476	0,506
	423	0,541	0,0847	0,912	0,564	0,541

Все измерения проведены при постоянных пористостях материалов, и все результаты, приведенные в таблице 2.2, и выводы будут справедливы только при значениях пористости, соответствующих максимальной утрамбовке компонентов без нарушения их структуры.

Известно, что повышенные температуры ухудшают свойства волокна и семян хлопка-сырца. Предельно допустимой температурой нагрева волокна является температура 70-75 °С, так как волокно содержит жиро-восковые и пектиновые вещества с температурой плавления 65-80 °С. Для семян предельно допустимая температура нагрева составляет 45-50 °С, так как при более высоких температурах белок в ядре семени хлопка-сырца начинает свертываться [81].

Как следует из анализа данных таблицы 2.2, при повышенных температурах, превышающих предельные температуры нагрева компонентов хлопка-сырца, в температурной зависимости теплофизических параметров появляются отклонения от монотонности, обусловленные возникновением химических, биологических и структурных изменений в компонентах. Сильнее всего реагирует на эти изменения изобарная теплоемкость хлопка-сырца и его компонентов.



Так как измеряем не истинные теплофизические параметры компонентов хлопка-сырца, а эффективные, то возникает вопрос о возможности их использования при расчете технологического процесса сушки хлопка-сырца.

Анализ условий в измерительной ячейке и условий, при которых находится хлопок-сырец при сушке, привел нас к заключению, что измеренные эффективные изобарные теплоемкости хлопка-сырца и семян хлопка-сырца при определенной пористости будут близки к соответствующим значениям теплоемкостей при сушке. При сушке хлопок-сырец обтекается агентом сушки, состоящим из смеси воздуха с топочным газом. Однако внутри отдельной дольки, т.е. содержимого одной створки коробочки хлопчатника, волокна и семена не обтекаются агентом сушки. Агент сушки в них неподвижен, как в измерительной ячейке при эксперименте. Что касается эффективной теплопроводности кожуры, то она за вычетом конвективной и лучистой составляющих потока тепла, тоже будет близка при определенной пористости к теплопроводности кожуры при сушке. Этого нельзя сказать об эффективной температуропроводности ядра, так как при сушке ядро окружено кожурой и не граничит с газом [79].

Нами были проведены исследование физико-химических свойств и геометрических параметров хлопка сырца [82,83]. Для этого использовали многоцелевой растровый электронный микроскоп JSM-6490LV\_(полезное увеличение 300 000), который сочетает в себе возможности работы как в стандартном, так и в низковакуумном режимах. Позволяет исследовать образцы без напыления токопроводящим слоем. Дополнительно снабжен системой энергодисперсионного микроанализа INCA Energy 350 и приставкой для исследования текстуры и структуры образцов HKL Basic.

По химическому составу волокно хлопка состоит из 95-98% целлюлозы, остальные природные воски, жиры, белки и около 1% минеральные примеси. Исследуемое волокно хлопка (рисунок 2.1) представляло собой тонкие ворсинки длиной 25 - 45 мм и средней толщиной 4.51 мкм и средней шириной 24.8 мкм (170 мтекс). Удельная плотность волокна хлопка составляет  $1520 \text{ кг/м}^3$ .

Увлажненное волокно не разрушается при температуре даже выше  $250 \text{ }^\circ\text{C}$ . До тех пор пока влага из волокна удаляется испарением, температура его не превышает  $100^\circ\text{C}$ . Однако после потери влаги волокно быстро разрушается с образованием различных жидких и газообразных продуктов. При температуре  $400\text{—}450 \text{ }^\circ\text{C}$  волокно обугливается. Волокно выдерживает кратковременное нагревание до температуры  $120\text{—}150 \text{ }^\circ\text{C}$  [12].

Под действием минеральных кислот волокно хлопка разрушается в результате гидролиза целлюлозы. Щелочеустойчивость хлопковых волокон очень высокая: даже при кипячении в растворах щелочей без доступа кислорода волокна почти не изменяются. Но при кипячении в растворах едких щелочей с доступом воздуха механическая прочность волокна уменьшается вследствие окисления целлюлозы. Своеобразно действуют на хлопковые волокна крепкие растворы едких щелочей на холоде (при температуре  $15\text{—}18 \text{ }^\circ\text{C}$ ): волокна

набухают, укорачиваются, теряют извитость, их прочность и блеск (при натяжении) повышаются, улучшаются адсорбционные свойства [9,11].

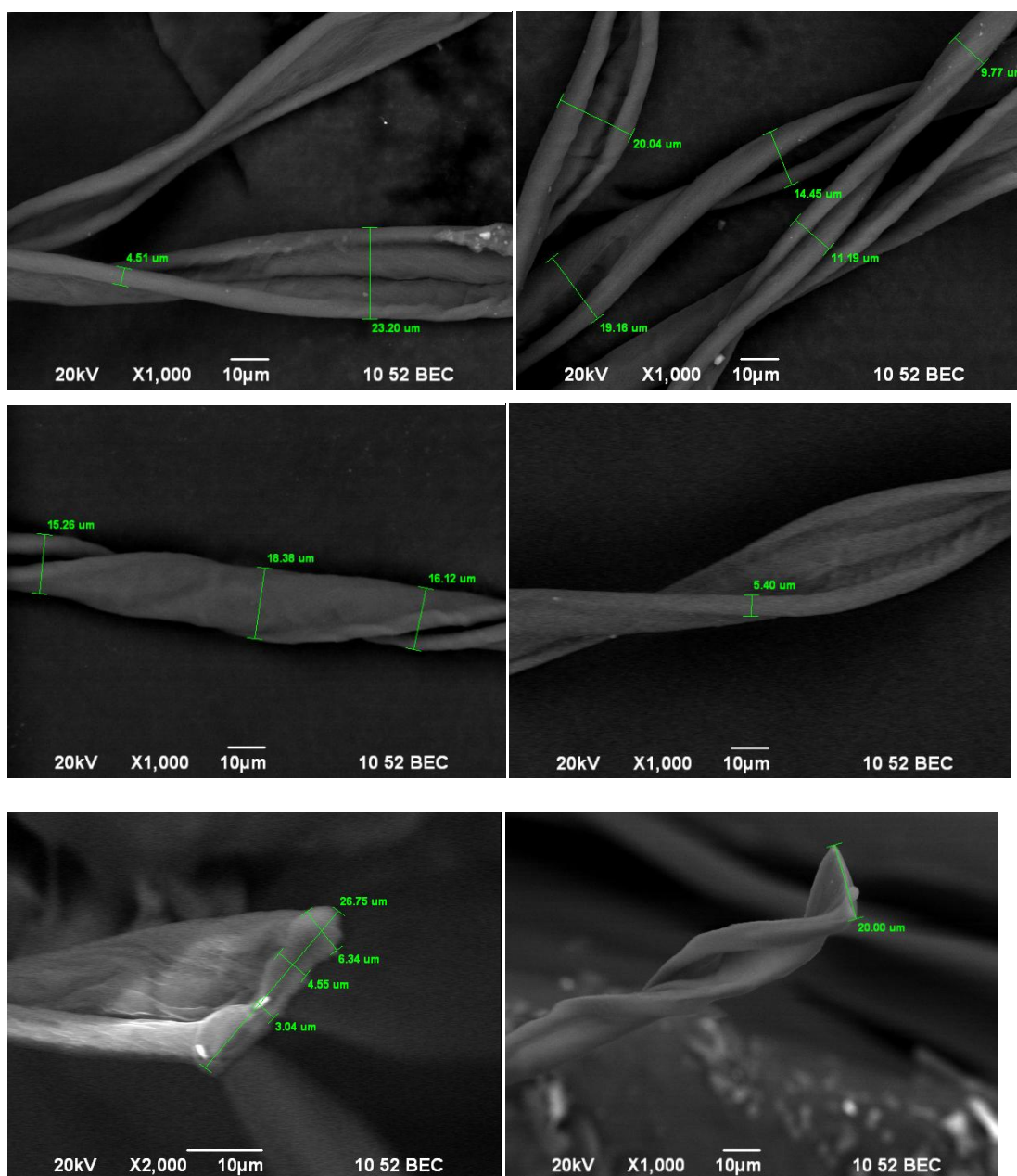


Рисунок 2.1-Результаты исследования хлопка сырца многоцелевым растровым электронным микроскопом [82,84]

Зрелое хлопковое волокно представляет собой элементарную вытянутую растительную клетку и под микроскопом имеет вид сплюсненной трубочки со штопорообразной извитостью, суживающейся по концам (к верхнему — в большей степени, к нижнему — в меньшей). Верхний конец волокна конусообразный, наглухо закрыт. Нижний конец, примыкавший к семени, оборван и имеет открытый канал. Поверхность волокна покрыта тонким слоем жировосковых веществ — первичной стенкой, или кутикулой. Этот слой выполняет защитную роль и обладает достаточно высокой химической стойкостью, малыми смачиваемостью и водопроницаемостью, облегчает

скольжение волокон в процессе их прядения. Первичная стенка имеет небольшую толщину (около 0,1 мкм), причем верхний слой ее упакован менее плотно, чем внутренний, вследствие расширения поверхности волокна в процессе его роста. Фибриллы целлюлозы в первичной стенке не имеют строгой ориентации. За кутикулой расположена вторичная стенка хлопкового волокна. Этот слой является основным, содержит наибольшее количество целлюлозы. Вторичная стенка состоит из параллельно ориентированных и плотно упакованных фибрилл, располагающихся по спирали вокруг оси волокна в виде концентрических цилиндрических слоев (колец роста) [12].

Надмолекулярная структура стенки волокна на разных ее участках неоднородна. На поперечных срезах волокон заметны три зоны, различающиеся микроструктурой и отношением к действию реагентов. Первая зона соответствует местам с большей плотностью фибриллярной структуры и, следовательно, наименьшей доступностью для реагентов. Вторая зона имеет хорошо ориентированную структуру концентрических слоев, но больше изменяется под действием реагентов. Для третьей зоны характерна неорганизованная и более рыхлая структура, поэтому волокно здесь легче поддается воздействию реагентов. Внутри волокна проходит канал, который у зрелого волокна заполнен воздухом.

Внешний вид волокон изменяется в зависимости от степени зрелости. Зрелые волокна имеют хорошо развитые стенки, вследствие чего обладают высокими механическими свойствами; у перезрелых волокон почти округлая форма, небольшой канал, они обладают большей хрупкостью; стенки незрелых волокон развиты слабо, волокна лентообразные, малопрочные, плохо окрашиваются. Для волокна хлопка установлено 11 групп зрелости, характеризующихся коэффициентом зрелости — от 0 до 5 баллов.

Зрелое хлопковое волокно имеет закрученность (извитость) величиной 40—120 извитков на 1 см. Извитость повышает цепкость волокна и способствует образованию прочной нити при прядении. Длина хлопковых волокон колеблется в довольно широких пределах — от 1 до 55 мм. Хлопок длиной менее 20 мм непригоден к прядению. В зависимости от длины волокон хлопок подразделяют на коротковолокнистый (20—27 мм), средневолокнистый (28—34 мм) и длиноволокнистый (35—55 мм). Длина волокна хлопка определяет способ переработки его в пряжу и свойства получаемой пряжи. Длинноволокнистый хлопок имеет наименьшую толщину не более 20 мкм (125—167 мтекс) и является тонковолокнистым, толщина средневолокнистого хлопка 20—23 мкм (167—200 мтекс), коротковолокнистого — более 23 мкм (222—333 мтекс), этот хлопок грубоволокнистый. Чем длиннее хлопковые волокна, тем больше они извиты [12].

В результате качественного и количественного анализа компонентов с помощью многоцелевого растрового электронного микроскопа JSM-6490LV определены исходные данные для проведения экспериментальных исследований, которые приведены в таблице 2.3. Эти полученные данные

необходимы для установления режима сушки, гидродинамических и тепломассообменных параметров процесса.

Таблица 2.3-Характеристики слоя волокна хлопка

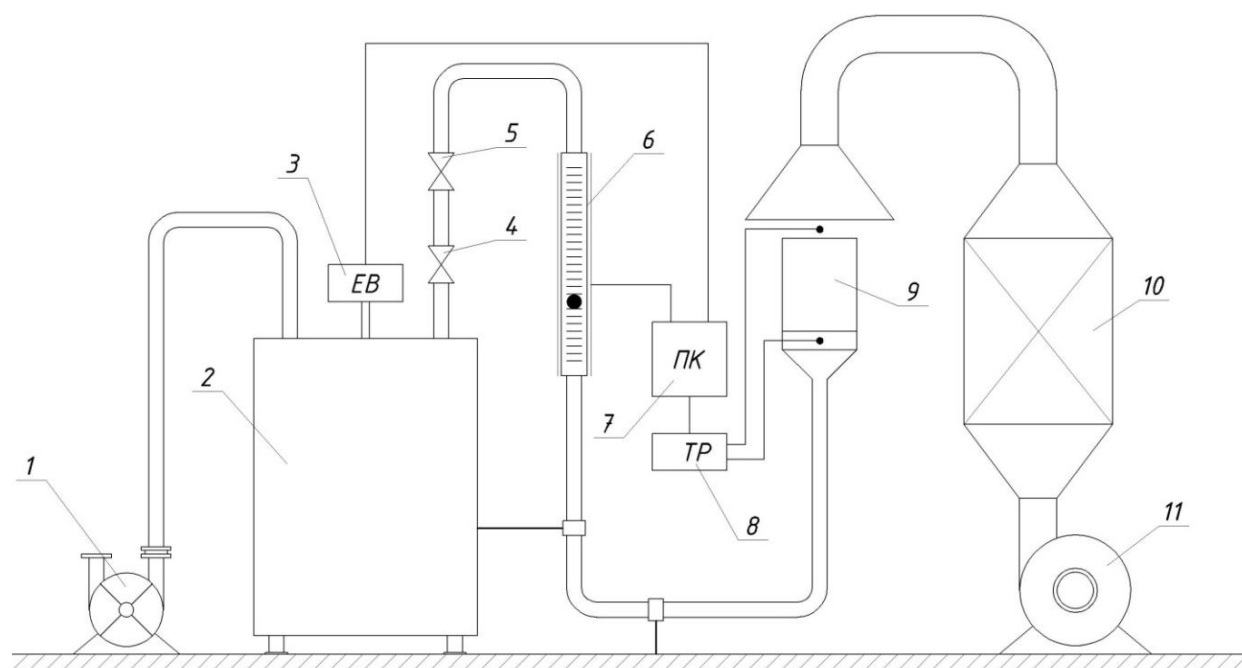
Масса навески, $G_v$ , кг.	Начальная порозность слоя, $\varepsilon_0$	Поверхность всех ворсинок хлопка, $F$ , $m^2$	Высота слоя волокна плотностью $\rho_v$ $H_v$ , $m$	Общая длина всех ворсинок хлопка, $L$ , $m$
0.010	0.990	3.448	0.00101	58824
0.015	0.987	5.172	0.00151	88235
0.020	0.986	6.897	0.00201	117647
0.025	0.984	8.621	0.00252	147059
0.030	0.981	10.345	0.00302	176471
0.060	0.966	20.689	0.00604	352941
0.080	0.955	27.586	0.00806	470588
0.110	0.942	37.931	0.01108	647059

## 2.2 Описание экспериментальной установки для исследования гидродинамических, кинетических и тепло - и массообменных параметров процесса фильтрационной сушки волокнистых материалов

На рисунке 2.2 представлена схема экспериментальной установки для проведения исследований гидродинамических, кинетических и тепломассообменных параметров, которая позволяет реализовать процесс фильтрационной сушки волокнистых материалов [41,85].

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 выводятся 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 [85].

Схема контейнера представлена на рисунке. 2.3. Основа контейнера 1 выполнена из дюралюминия. Перфорированная перегородка 3 и боковая стенка 2 выполнена из теплоизоляционного материала (фторопласта), чтобы предотвратить кондуктивный нагрев частиц волокон хлопка-сырца во время сушки [84].

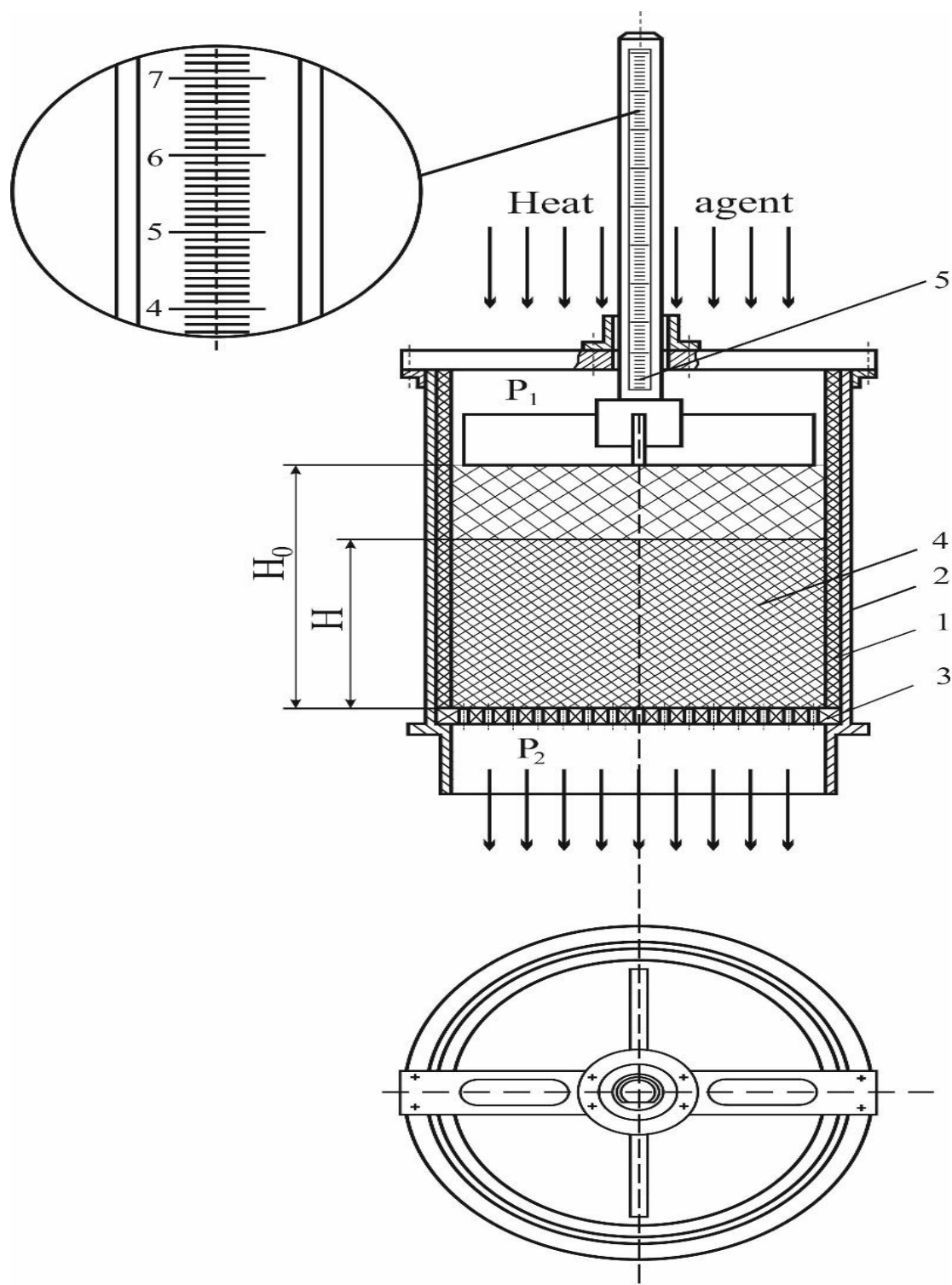


1 - циркуляционный вакуумный насос; 2 - ресивер; 3 - электронный вакуумметр ДВ250А; 4, 5 - запорный и регулирующий вентили; 6 - электронный ротаметр; 7 - персональный компьютер 8 электронный терморегулятор SESTOS D1S; 9 - контейнер; 10 - калорифер; 11 - вентилятор.

Рисунок 2.2- Схема экспериментальной установки

Для исследования гидродинамики движения теплового агента сквозь слой волокна хлопка-сырца 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 [82-86]. При увеличении перепада давления, вследствие увеличения скорости движения теплового агента сквозь слой материала, наблюдается уменьшение высоты. По шкале мерной линейки 5 фиксировали изменение высоты слоя волокна хлопка-сырца.

Для исследования кинетики сушки фильтрационного слоя волокнистых материалов по сухому материалу устанавливали необходимую скорость фильтрования 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 [63].



1 - корпус контейнера, 2 - теплоизоляционная вставка, 3 - перфорированная перегородка, 4- слой волокна хлопка, 5- мерная линейка,  $H_0$  - начальная высота навески волокна хлопка, мм,  $H$  - текущая высота волокна хлопка во время изменения перепада давлений, мм.

Рисунок 2.3- Схема контейнера для загрузки волокнистого материала

Для исследование внешнего теплообмена между частицами сухого материала и тепловым агентом высушенные до постоянного веса волокна хлопка-сырца 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.

### **2.3 Методика определения основных параметров пористой структуры слоя волокнистых материалов**

Известно, что пористой структуре волокнистого материала присущи такие характеристики: адсорбционная способность, диффузионная проницаемость, теплопроводность и тому подобное. В случае использования фильтрационной сушки для сушки волокнистых материалов строение такого слоя определяет особенности гидродинамики и теплообмена при фильтровании теплового агента сквозь слой материала.

Существуют различные методы исследования пористой структуры слоя. Все они отличаются между собой сложностью проведения исследования, информативностью и границами применения. Частицы волокон хлопка являются пористым материалом. Для определения пористости слоя объекта исследования, насыпной плотности нами использовались методики, приведенные [87,88]. Истинную плотность исследуемого материала брали из справочных данных [12].

Насыпную плотность волокон хлопка определяли по методике, приведенной в ГОСТ 25699.14-93. Высушенный до постоянной массы материал засыпали по центру в исхоженный цилиндрический сосуд с помощью воронки до образования конуса над емкостью. Лишние частицы материала “срезали” шпателем. Соотношение между диаметром емкости и эквивалентным диаметром каналов между частицами составляло  $\frac{D}{d_e} \geq 20$ . Взвешивание осуществляли на аналитических весах AXSIS-3000 (до 3000 гр), эксперимент проводили 15 раз. Наибольшее и наименьшее значение отвергали, а насыпную плотность определяли по формуле:

$$\rho_{нас} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \frac{m_i}{V_i} \quad (2.8)$$

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

Учитывая то, что частицы волокна хлопка-сырца являются пористыми, то определяли как внутреннюю порозность частиц, так и порозность слоя. Общую порозность стационарного слоя пористых частиц можно представить зависимостью [52]:

$$\varepsilon = \varepsilon_c + \varepsilon_{вн} \quad (2.9)$$

Величина порозности, то есть объемная доля пустот внутри волокон хлопка, определяет способность волокон удерживать воду, чем больше порозность, тем больше воды может удерживать волокно. Порозность получается путем деления общего объема воды, выдавливаемой из образца, на объем самого образца [21].

Поэтому порозность слоя определяли методом двух жидкостей. Высушенный до постоянной массы слой волокон хлопка-сырца взвешивали на аналитических весах. Помещали сухой материал в колбу, заполненную бензолом, и выдерживали в течение двух суток, для удаления воздуха из пор смесь перемешивали. После отстаивания фиксировали объем бензола, что находился над слоем волокон хлопка-сырца и объем твердого материала. На основе этих замеров определяли суммарную порозность материала. Для определения порозности слоя определяли объем пор между частицами по следующей методике. Сливали бензол из колбы, а его остатки с поверхности частиц удаляли с помощью фильтровальной бумаги. Пропитанные бензолом волокна хлопка помещали в мерный цилиндр и определяли общий объем, который занимал материал. Мерный цилиндр наполняли дистиллированной водой из бюретки на 100 мл выше, чем верхняя граница материала. Для предотвращения всплытия их накрывали металлической сеткой. Объем пор волокон определяли на основе общего объема дистиллированной воды, которую заливали в мерный цилиндр (без учета объема жидкости), находящейся над слоем материала (с учетом объема металлической сетки). Порозность слоя рассчитывали по формуле [52]:

$$\varepsilon_{\varepsilon} = 1 - \frac{V_n}{V_{общ}} \quad , \quad (2.10)$$

где:  $\varepsilon_{\varepsilon}$  – порозность определенная экспериментальным путем,  $м^3 / м^3$ ;  $V_n$  – объем пор,  $м^3$ ;  $V_{общ}$  – общий объем,  $м^3$ .

Чтобы исключить погрешность определения внутренней пористости слоя, полученные результаты общей пористости слоя волокон хлопка-сырца сравнивали с теоретически рассчитанными на основе рекомендаций, приведенных в [88]:



$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{нас}}{\rho_{ус}}, \quad (2.11)$$

где:  $\rho_{нас}$  – насыпная плотность пробы,  $кг/м^3$ ;  $\rho_{ус}$  – условная плотность материала,  $кг/м^3$ .

Слой волокон хлопка-сырца представляет собой смесь волокон, имеющих цилиндрические и пластинчатые формы. В связи с этим, представить определяющий размер стационарного слоя одним усредненным параметром волокна невозможно. Поэтому, как определяющий размер для стационарного слоя волокон хлопка-сырца, сквозь который фильтруется тепловой агент, нами был выбран эквивалентный диаметр каналов между частицами. Для этого волокна хлопка-сырца разделяли на фракции по диаметру частиц, которые проходили через калиброванные отверстия. Диаметры частиц каждой фракции определяли путем измерения под микроскопом модели МБИ-11 с помощью мерной шкалы, а усредненный диаметр определяли средневзвешенную величину по зависимости (2.12):

$$d_{ус} = \sum \frac{x_i \cdot d_i}{x_i}, \quad (2.12)$$

где:  $d_{ус}$  – усредненный диаметр частиц фракции, м;  $x_i$  – массовая доля частиц с размером  $d_i$ .

Учитывая большое разнообразие длин частиц одной фракции по массе фракции, условной удельной плотностью хлопка-сырца и усредненным диаметром, определяли суммарный объем волокон, а на его основе рассчитывали суммарную их длину. Суммарную поверхность слоя волокон хлопка-сырца определяли как поверхность пластины каждой фракции с средней шириной, толщиной и длиной на основе зависимости [84-86]:

$$F_{фр} = 2 \cdot (a + b) \cdot L_{фр} \quad (2.13)$$

Удельная поверхность слоя волокон хлопка-сырца определялась из зависимости [53]:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^N F_{фр}}{V_{общ}} \cdot K_n, \quad (2.14)$$

где:  $F_{фр}$  – суммарная поверхность всех частиц волокон  $i$ -ой фракции,  $м^2$ ;  $V_{общ}$  – общий объем слоя материала,  $м^3$ ;  $K_n$  – коэффициент взаимного экранирования поверхности частицами в слое.

Эквивалентный диаметр каналов, сквозь которые фильтруется тепловой агент, рассчитывали из зависимости [51]:

$$d_e = \frac{4 \cdot \varepsilon_c}{a} \quad (2.15)$$

## **2.4 Описание конструкции и принципа работы фильтрационной установки для сушки хлопка сырца**

В настоящее время на хлопкоперерабатывающих заводах при использовании сушильных барабанов типа 2СБ-10, СБТ, СБО ухудшаются свойства сырья. В результате последующих технологических процессов сортность волокна снижается на 25% через механическое воздействие, тратится много энергии, теряется цвет волокна, а также происходит скручивание волокна, ухудшается микроструктура волокна [12], а для сушки растительного сырья применяются различные способы и сушильные устройства, которые не приемлемы для сушки хлопка сырца. Поэтому экспериментальные и теоретические исследования сушки хлопка, уменьшение себестоимости технологических процессов переработки волокна хлопка и улучшения их качественных характеристик имеют актуальное значение для экономики Казахстана. Внедрение новых высокоэффективных и ресурсосберегающих технологий переработки хлопкового сырья в готовый продукт высокого качества будет конкурентоспособным не только на внутреннем, но и на внешних рынках.

Анализ источников литературы [1-4] позволяет сделать вывод об отсутствии комплексного и системного подхода к интенсификации процессов сушки влажного волокна хлопка, учитывая то, что она содержит в основном связанную влагу, является термолабильным материалом, а процесс сушки проходит во втором периоде. Выбор режима сушки хлопка-сырца зависит от следующих показателей: цвет, длина волокна, типа механического повреждения и тому подобное. Во время сушки хлопка-сырца важно выбрать оптимальный режим сушки, поскольку при несоответствующих параметрах сушки, наблюдается обрыв волокна, уменьшение его длины, в результате чего снижается качество волокна [7-9,12].

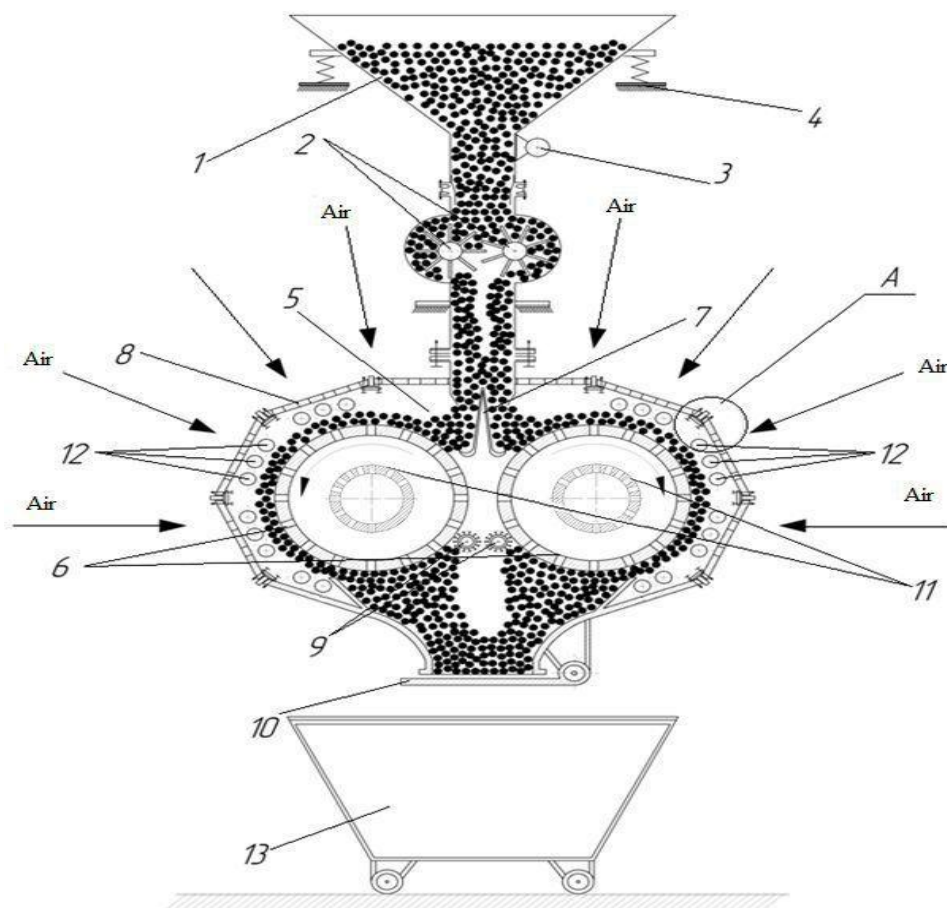
Теоретический анализ и проектирование систем сушки осложняются рядом факторов, в частности одновременным тепломассопереносом к поверхности и внутри материала, перенос влаги внутри материала, при этом существуют более двадцати видов различных механизмов переноса влаги в твердом теле [89-92]. Изменение влагосодержания и температуры материала определяется тепломассопереносом между поверхностью тела, окружающей средой и внутренней частью высушиваемого материала [75].

Для реализации процесса сушки хлопка сырца, как отмечалось выше, в промышленности используют сушилки барабанного типа и сушилки кипящего слоя, которые являются энергозатратными и дорогими. Поэтому перед нами стояла задача разработать новый тип сушилки, который позволит снизить энергетические затраты на процесс сушки.

Обобщение результатов экспериментальных и теоретических исследований гидродинамики и тепло - и массообмена при фильтрационной сушке позволили разработать конструкцию установки для сушки хлопка-сырца, которая учитывает физико-механические свойства хлопка-сырца [86].

Нами предлагается использование принципиальной схемы установки фильтрационной сушки барабанного типа для сушки хлопка-сырца (рисунок 2.4).

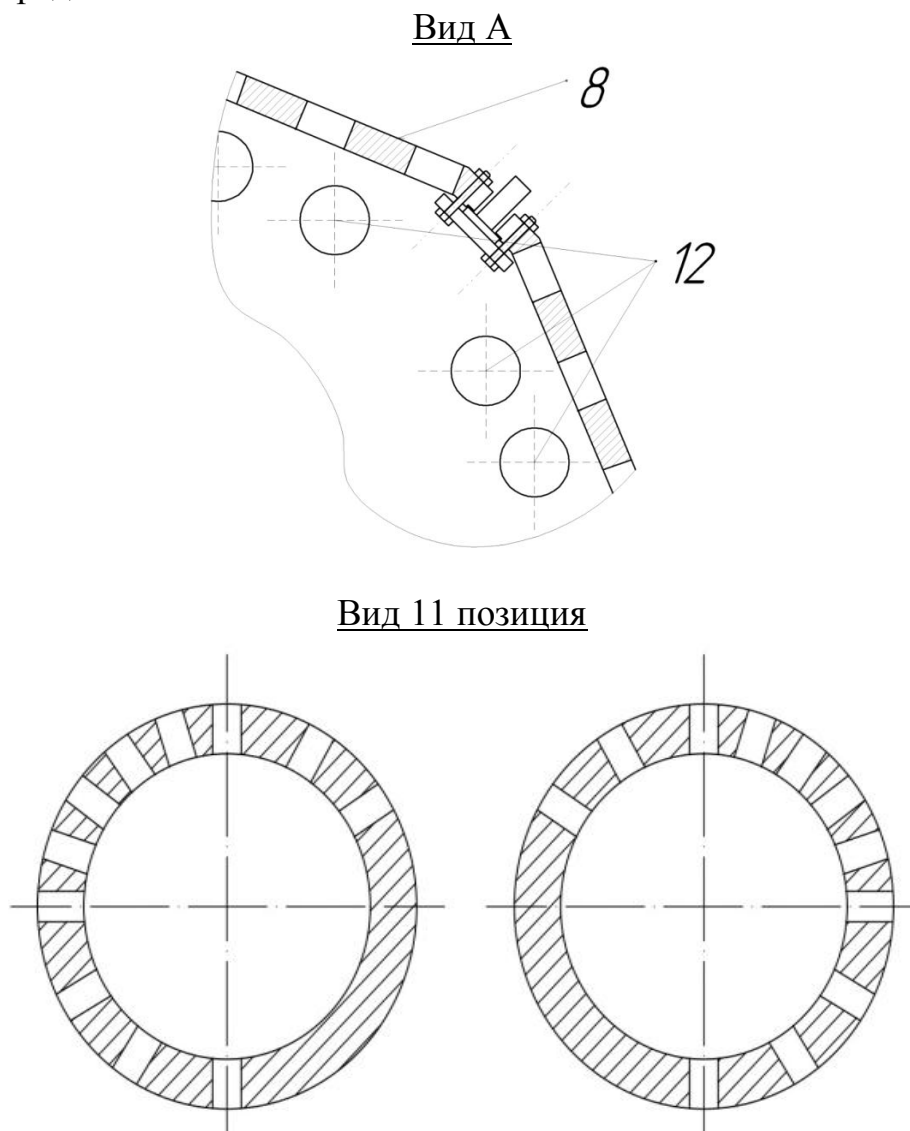
Установка для фильтрационной сушки хлопка-сырца (рисунок 2.4) состоит из бункера 1, который служит для подачи сырья, в нижней его части установлен дозатор 2 и вибратор 3, а сам бункер 1 установлен на пружины 4. Нижняя часть бункера 1 прикреплена к сушильной камере 5, в которой параллельно размещены перфорированные барабаны 6 с перфорированной втулкой 11. Перфорированные барабаны 6 разделены между собой перегородкой 7. Система нагрева теплового агента 12 расположена внутри камеры сушки 5. Корпус сушильной зоны сделан из перфорированных листов 8. На барабане 6 в зоне выгрузки сухого материала установлены щетки 9. В нижней части сушильной камеры 5 установлена подпружиненная крышка 10, которая служит для автоматической выгрузки сухого материала в контейнер 13. Перфорированные барабаны к вакуумной линии подсоединяются через перфорированные втулки 11. Контейнер 13 предназначен для сухого материала.



1 - бункер, 2 - дозатор, 3 - вибратор, 4 - пружины, 5 - сушильная камера, 6 - перфорированные барабаны, 7 - перегородка, 8 - перфорированные листы, 9 - щетки 10 - подпружиненная крышка, 11 - перфорированные втулки, 12 - система нагрева, 13 – контейнер

Рисунок 2.4- Установка фильтрационной сушки барабанного типа

Установка работает следующим образом. Включают вибратор 3 и вакуум-линию, вследствие чего тепловой агент проходит сквозь перфорированные листы 8, которые обеспечивают равномерное высушивание материала и облегчают переналадку установки для другого типа материала, или для другой влажности. Воздух нагревается непосредственно в камере сушки 5 системой нагрева 12 (рисунок 2.5), которая размещена непосредственно в камере сушки, что дает возможность уменьшить потери тепла в окружающую среду. Вследствие того, что перфорированные листы корпуса 8 омываются воздухом окружающей среды, их температуры, приблизительно равны температуре окружающей среды.



8 - перфорированные листы, 11 - перфорированные втулки, 12 - система нагрева  
 Рисунок 2.5- Схема размещения системы нагрева в сушильной зоне

Одновременно включается вращение барабанов 6 и щеток 9. Влажный материал поступает в бункер 1 и при помощи дозаторов 2 подается в сушильную камеру 5 на два перфорированных барабана 6, между которыми установлена перегородка 7 и которые вращаются в противоположные стороны. Перегородка 7 служит для формирования равномерного слоя волокна хлопка-

сырца. За счет разрежения влажный материал прочно прижимается к перфорированной поверхности барабана и вращается вместе с ним в направлении, изображенном на рисунке 1. Щетки 9 служат для очистки перфорированной перегородки от частиц сухого материала. Чтобы исключить зависание влажного материала, вследствие слеживания или уплотнения, и образованию так называемой воронки, на бункере 1 установлен вибратор 3. Амплитуду и частоту колебания вибратора 3 устанавливают экспериментальным путем в зависимости от влажности и адгезионных свойств высушиваемого материала. Контейнер 13 предназначен для выгрузки сухого материала из зоны сушки [85].

### **3 ГИДРОДИНАМИКА ФИЛЬТРАЦИОННОЙ СУШКИ ХЛОПКА СЫРЦА В СТАЦИОНАРНОМ СЛОЕ**

Движение газового потока сквозь пористую структуру материала представляет собой смешанную задачу гидродинамики. Однако теоретических основ смешанной задачи гидродинамики на сегодня не существует. Для описания гидродинамики движения газа сквозь пористую структуру материала в научных статьях авторы используют теоретические зависимости внутренней или внешней задачи [3]. Учитывая то, что интенсивность тепло - и массообмена определяет скорость движения теплового агента относительно элементов пористого слоя, в данной работе представим результаты экспериментальных исследований потерь давления в слое волокна хлопка с точки зрения внутренней задачи гидродинамики [93,94].

По своему строению хлопок-сырец является неоднородным материалом и состоит из трех основных компонентов – самого хлопкового волокна, кожуры и ядра семян. Химический состав компонентов различен, поэтому различны и их влагопоглощающие свойства. Хлопковое волокно и кожура семян относятся к капиллярно-пористым материалам. В целом хлопок-сырец является коллоидным капиллярно-пористым телом и содержит все виды влаги. Известно, что процесс удаления влаги из материала сопровождается нарушением связи ее с материалом, на что затрачивается значительное количество энергии [12].

Одним из высокоинтенсивных методов удаления как свободной, так и связанной влаги является фильтрационная сушка. Это обусловлено тем, что во время фильтрационной сушки тепловой агент фильтруется сквозь пористую структуру влажного материала, который размещен на перфорированной перегородке в направлении «влажный материал–перфорированная перегородка». Скорость движения теплового агента в порах и каналах стационарного слоя влажного материала определяет толщину пограничного слоя (гидродинамического, теплового и диффузионного) и соответственно значения коэффициентов тепло - и массоотдачи. Кроме этого, поверхностью тепло - и массообмена является суммарная поверхность пор и каналов сквозь которые фильтруется тепловой агент. Скорость фильтрации теплового агента определяют исходя из технико-экономических соображений, учитывая то, что ее увеличение влияет на рост потери давления. Причем, действительная скорость движения теплового агента относительно элементов слоя значительно выше, чем в случае сушки любыми другими методами (в кипящем слое, во время сушки в пневмотранспортных сушилках и др). Большая поверхность тепло - и массообмена и скорость теплового агента в порах и каналах стационарного слоя влажного материала обеспечивают высокие коэффициенты тепло - и массоотдачи и соответственно интенсивность фильтрационной сушки [10, с.3].

Вместе с этим суммарные затраты энергии на процесс фильтрационной сушки состоят из потерь давления в стационарном слое и нагрева теплового агента (воздух) до заданной температуры. Учитывая выше сказанное важно установить зависимость потерь давления в стационарном слое влажного

волокна хлопка от фиктивной скорости фильтрации теплового агента, как важного фактора определяющего интенсивность и экономическую эффективность фильтрационной сушки[3].

### 3.1 Расчет гидродинамических параметров

Как показал эксперимент стационарный слой волокна хлопка во время приложения перепада давлений, для обеспечения соответствующей скорости фильтрации теплового агента, вследствие незначительной жесткости отдельных хаотически размещенных волокон в экспериментальной емкости меняет свою высоту. Это приводит к изменению эквивалентного диаметра каналов, через которые движется тепловой агент, порозности слоя и соответственно действительной скорости. Изменение действительной скорости фильтрации газового потока  $v$  приводит к росту потерь давления в слое  $\Delta P$ , а высота слоя волокна хлопка  $H$  – к росту объемной плотности  $\rho_v$  (аналог насыпной плотности для дисперсных материалов). То есть:  $H = f(\Delta P)$ ;  $d_e = f(\Delta P)$ ;  $\varepsilon = f(\Delta P)$ ;  $\rho_v = f(\Delta P)$ ;  $\Delta P = f(v)$ . При этом постоянными величинами остаются лишь масса навески волокна и  $G_v = const$  и внешняя поверхность всех волокон хлопка  $F = const$  [84,92].

Потери давления в пористом стационарном слое определяют на основе известной зависимости Дарси-Вейсбаха поскольку она учитывает все возможные переменные эксперимента [86]:

$$\Delta P = \lambda_l \cdot \frac{H}{d_e} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2}, \quad (3.1)$$

где  $\lambda_l$  – коэффициент гидравлического сопротивления слоя;

$\Delta P$  – потери давления в слое материала, Па ;

$H$  – текущая высота слоя, в зависимости от потерь давления, м.

$d_e$  – эквивалентный диаметр, м ;

$\rho$  – плотность газового потока, кг/м<sup>3</sup> ;

$v$  – действительная скорость движения газового потока, м/с .

Эквивалентный диаметр  $d_e$  пор и каналов, через которые фильтруется теплоноситель, определяется зависимостью:

$$d_e = \frac{4 \cdot \varepsilon_l}{S_{\text{тек}}}, \quad (3.2)$$

где  $\varepsilon_l$  – порозность слоя, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> ;

$S_{\text{тек}}$  – текущая удельная поверхность слоя, м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup> ;

Как уже было сказано выше, при приложении перепада давления высота слоя уменьшается, что влияет на изменение эквивалентного диаметра и активной удельной поверхности. Начальная удельная поверхность хлопкового волокна  $S_0$  зависит от начальной высоты слоя хлопкового волокна и его объема. Определим начальную удельную поверхность волокна  $S_0$ :

$$S_0 = \frac{F}{H_0 \cdot S} \quad (3.3)$$

где  $H_0$  – начальная высота слоя волокна хлопка, м;  
 $S$  – площадь поперечного сечения экспериментальной емкости, м<sup>2</sup>.

Для определения начальной удельной поверхности всех ворсинок хлопка  $S_0$  предположим, что в экспериментальной емкости находится  $N$  одинаковых ворсинок длиной  $L_v$ . Тогда внешнюю поверхность всех частиц можно представить в виде [85]:

$$F = 2 \cdot (a + b) \cdot L_v \cdot N, \quad (3.4)$$

где  $a$  и  $b$  – средняя ширина и толщина ворсинки хлопка, соответственно, м.

Зная удельную плотность волокна хлопка  $\rho_v$  и массу навески  $G_v$  найдем объем волокна хлопка:

$$V = \frac{G_v}{\rho_v} = a \cdot b \cdot L_v \cdot N, \quad (3.5)$$

откуда определим количество ворсинок  $N$ :

$$N = \frac{G_v}{\rho_v \cdot a \cdot b \cdot L_v}, \quad (3.6)$$

тогда поверхность всех ворсинок хлопка:

$$F = 2 \cdot (a + b) \cdot L_v \cdot \frac{G_v}{\rho_v \cdot a \cdot b \cdot L_v} = \frac{2 \cdot (a + b) \cdot G_v}{\rho_v \cdot a \cdot b}. \quad (3.7)$$

Определим начальные и текущие удельные поверхности условно стационарного слоя волокна хлопка, который находится в экспериментальной емкости, как отношение общей поверхности к объему:

$$S_0 = \frac{F}{S \cdot H_0} = \frac{2 \cdot (a + b) \cdot G_v}{\rho_v \cdot a \cdot b \cdot S \cdot H_0}, \quad (3.8)$$

а текущую удельную поверхность волокна хлопка представим в виде:

$$S_{\text{тек}} = S_0 \cdot \frac{H_0}{H} \quad (3.9)$$

где  $S_0$ ,  $S_{\text{тек}}$  – начальные и текущие удельные поверхности слоя волокна, м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>;  
 $H$  – текущая высота слоя волокна, в зависимости от потерь давления, м.

Тогда:

$$S_{\text{тек}} = S_0 \cdot \frac{H_0}{H} = \frac{2 \cdot (a + b) \cdot G_v}{\rho_v \cdot a \cdot b \cdot S \cdot H_0} \cdot \frac{H_0}{H} = \frac{2 \cdot (a + b) \cdot G_v}{\rho_v \cdot a \cdot b \cdot S \cdot H} \quad (3.10)$$

Выразим массу навески волокна хлопка через ее объем и удельную плотность:

$$G_v = V \cdot \rho_v = H_v \cdot S \cdot \rho_v \quad (3.11)$$

где  $H_v$  – высота слоя волокна с плотностью  $\rho_v$ , м.

Тогда текущую удельную поверхность условно стационарного слоя волокна хлопка можно представить в виде:

$$S_{\text{тек}} = \frac{2 \cdot (a + b) \cdot G_v}{\rho_v \cdot a \cdot b \cdot S \cdot H} = \frac{2 \cdot (a + b) \cdot H_v \cdot S \cdot \rho_v}{\rho_v \cdot a \cdot b \cdot S \cdot H} = \frac{2 \cdot (a + b)}{a \cdot b} \cdot \frac{H_v}{H}, \quad (3.12)$$

и тогда уравнение (3.2) можно записать в виде:



$$d_e = \frac{4 \cdot \varepsilon_l}{S_{\text{тек}}} = \frac{2 \cdot a \cdot b \cdot \varepsilon_l}{(a+b)} \cdot \frac{H}{H_v}, \quad (3.13)$$

а уравнения (3.1) с использованием (3.13) можно представить в виде:

$$\Delta P = \lambda_l \cdot \frac{H}{d_e} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} = \lambda_l \cdot \frac{H \cdot (a+b) \cdot H_v}{2 \cdot a \cdot b \cdot H \cdot \varepsilon_l} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} = \lambda_l \cdot \frac{(a+b) \cdot H_v}{2 \cdot a \cdot b \cdot \varepsilon_l} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad (3.14)$$

Известно, что коэффициент гидравлического сопротивления пористого слоя  $\xi$  определяют как часть скоростного напора, то есть уравнение (3.14) можно представить в виде[86]:

$$\Delta P = \xi \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} = \xi \cdot \frac{\rho \cdot v_0^2}{2 \cdot \varepsilon_l^2} \quad (3.15)$$

где  $\xi$  – коэффициент гидравлического сопротивления пористого слоя

$$\xi = \lambda_l \cdot \frac{(a+b) \cdot H_v}{2 \cdot a \cdot b \cdot \varepsilon_l}, \quad (3.16)$$

$v_0$  – фиктивная скорость фильтрования теплового агента  $v_0 = v \cdot \varepsilon_l$ , м/с.

### 3.2 Результаты экспериментальных исследований гидродинамики стационарного слоя волокна хлопка

Все эксперименты проводили при соответствующих навесках волокна хлопка. Учитывая то, что естественное влагосодержание волокна хлопка является незначительным (0.08 – 0.12 kg H<sub>2</sub>O/kg dry.mat.), причем влага в основном связанная, при температуре газового потока T=293 К и относительной влажности воздуха  $\varphi = 60\%$  ее испарения будет также незначительным (время проведения эксперимента составляла 90 – 120 с, потеря массы образца за время эксперимента составляла менее 0,2%), поэтому влияние испарения влаги на потери давления не учитывали [84].

Эксперименты по исследованию гидродинамики стационарного слоя хлопка-сырца проводили в экспериментальной установке, описанной в главе 2 настоящей диссертационной работы (рисунки 2.2, 2.3). В экспериментальный контейнер (рисунок 2.3) 9 загружают соответствующую навеску волокна хлопка и открывали регулирующие и запорные вентили 5 для соединения с ресивером 2. Включали вакуум-насос 1 и с помощью регулирующего вентиля 5 устанавливали различный расход воздуха сквозь слой волокна хлопка. Величину расхода определяли по показаниям ротаметра 6, потери давления по показаниям вакуумметра 3, а изменение высоты слоя волокна хлопка при помощи шкалы мерной линейки. Количество замеров составляла 8 – 10 точек, а каждый эксперимент проводили не менее трех раз до получения стабильных данных. Для каждого эксперимента брали свежую навеску хлопка. Массу каждой навески хлопка определяли с помощью электронного веса AXISIS-3000 с точностью 0,01 г. Начальная объемная плотность для каждого эксперимента одинаковой массы навески была одинаковой. Исходные данные для проведения экспериментальных и характеристики слоя волокна хлопка представлены в таблице 2.3, главы 2 настоящей диссертационной работы.

Экспериментальные результаты фильтрации теплоносителя через слой хлопкового волокна различной массы представлены в виде функциональной зависимости  $\Delta P = f(v_0)$  и приведены на рисунке 3.1 [84].

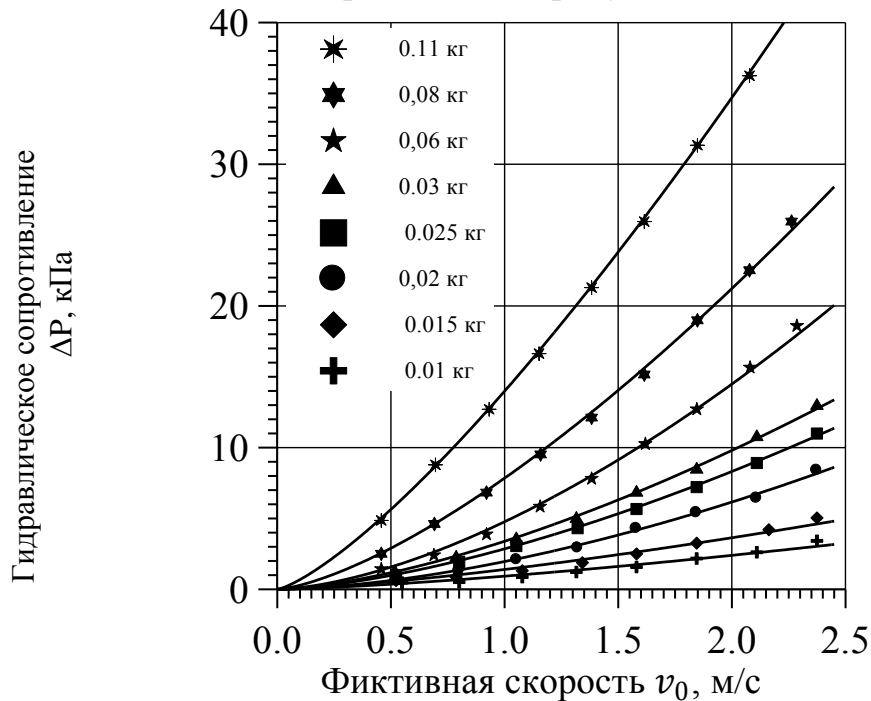


Рисунок 3.1- Зависимость потерь давления в условно стационарном слое волокна хлопка от фиктивной скорости фильтрации теплового агента

Анализ рисунка 3.1 показывает, что кривые имеют параболический характер, то есть на потери давления в условно стационарном слое волокна хлопка влияют как вязкостная, так и инерционная составляющие.

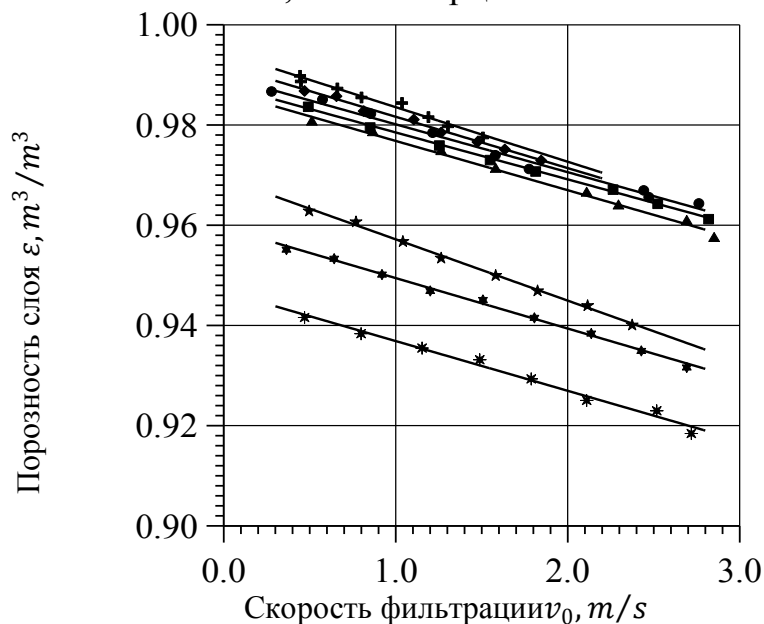
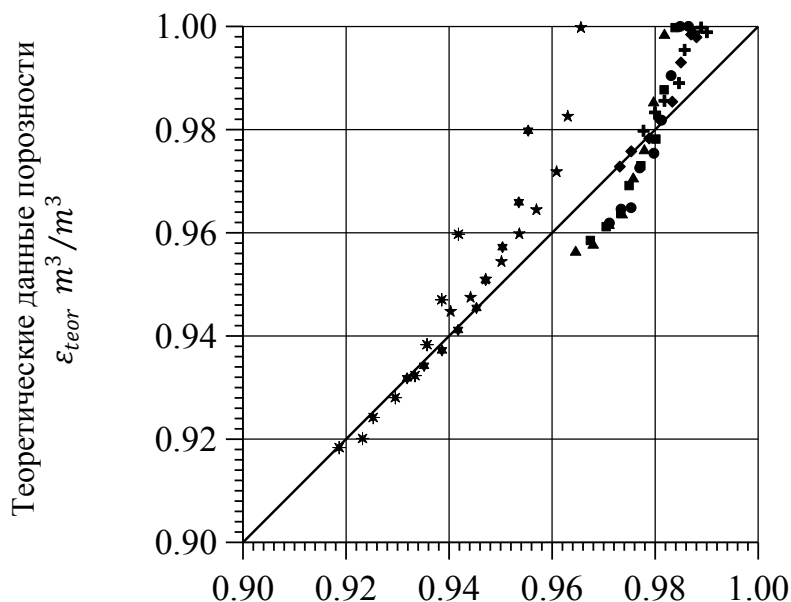


Рисунок 3.2- Зависимость порозности слоя волокна хлопка от фиктивной скорости фильтрации теплового агента (обозначения соответствуют рисунку 3.1)

На рисунке 3.2 приведено изменение порозности слоя волокна хлопка в зависимости от фиктивной скорости фильтрации теплового агента  $\varepsilon = f(v_0)$ .

Аппроксимировав экспериментальные данные степенной функцией мы получили следующую расчетную зависимость [84-85]:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot v_0^{-0.025} \quad (3.17)$$



Экспериментальные данные порозности  $\varepsilon_{eks} \text{ m}^3/\text{m}^3$

Рисунок 3.3- Сравнение экспериментальных и теоретически рассчитанных по зависимости (3.17) значений порозности условно стационарного слоя волокна хлопка (обозначения соответствуют рисунку 3.1)

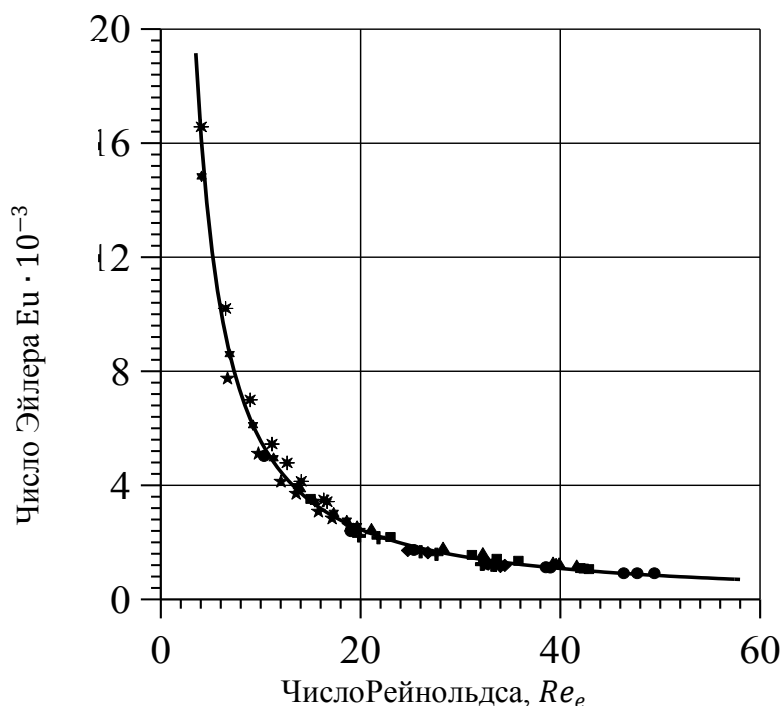


Рисунок 3.4- Зависимость числа Эйлера от числа Рейнольдса (обозначения соответствуют рисунку 3.1)

Сравнение экспериментальных данных порозности условно стационарного слоя волокна хлопка с теоретически рассчитанными на основе зависимости (3.17) приведены на рисунке 3.3 [84].

Как видно из рисунка 3.3 абсолютное значение максимальной относительной погрешности между экспериментальными данными и теоретически рассчитанными не превышает 5,6%.

Обобщение экспериментальных данных (рисунок 3.1) гидродинамики фильтрации теплового агента сквозь слой хлопка проводили в виде безразмерных комплексов зависимости числа Эйлера ( $Eu = \Delta P / (\rho \cdot v^2)$ ) от числа Рейнольдса ( $Eu = f(Re_e)$ ) (рисунок 3.4), а также зависимость коэффициента гидравлического сопротивления слоя  $\xi = f(Re_e)$  как функции числа Рейнольдса (рисунок 3.5) [85].

Аппроксимация экспериментальных данных приведенных на рисунке 3.4 степенной функцией позволила получить следующую расчетную зависимость [85]:

$$Eu = 84 \cdot 10^3 \cdot Re_e^{-1.18}, \quad (3.18)$$

где  $Re_e$  – эквивалентное значение числа Рейнольдса.

$$Re_e = \frac{v \cdot d_e \cdot \rho}{\mu}, \quad (3.19)$$

где  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости газового потока,  $Па \cdot с$ ;

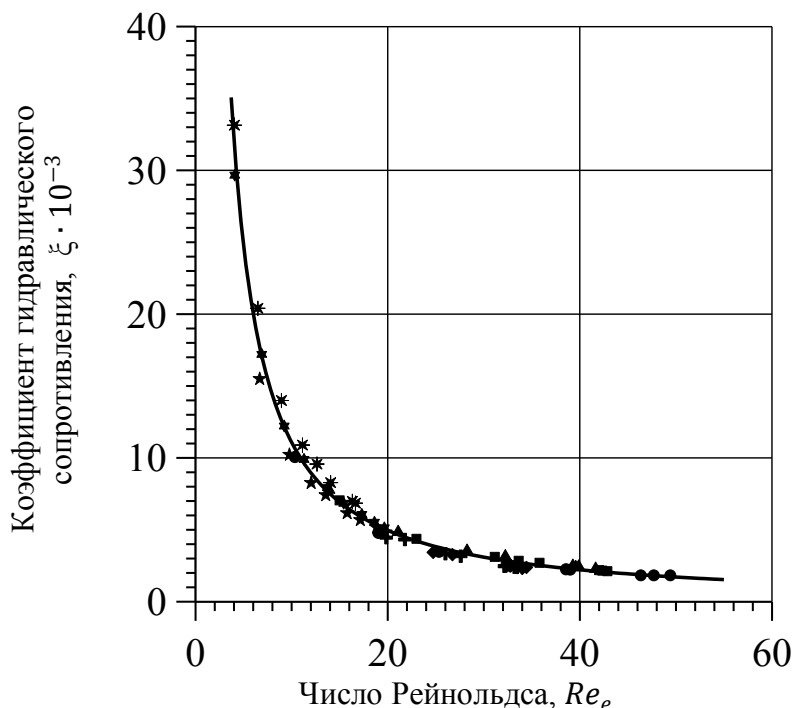


Рисунок 3.5- Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления волокна хлопка от числа Рейнольдса (обозначения соответствуют рисунок 3.1)

Коэффициент гидравлического сопротивления слоя волокна хлопка рассчитывали на основе экспериментальных данных приведенных на рисунке 3.1 из уравнения (3.15). Аппроксимация экспериментальных данных

приведенных на рисунке 3.5 степенной функцией позволила получить следующую расчетную зависимость [84]:

$$\xi = 16 \cdot 10^4 \cdot Re_e^{-1.16} \quad (3.20)$$

Сравнение отношения экспериментально определенных значений потерь давления в условно стационарном слое волокна хлопка с теоретически рассчитанным на основе зависимости (3.18) в зависимости от числа Рейнольдса приведены на рисунке 3.6. Абсолютное значение относительной погрешности не превышает 14,2%, что объясняется сложной структурой и стихийностью формирования стационарного слоя волокна хлопка, а также воздействием перепада давления на высоту слоя.

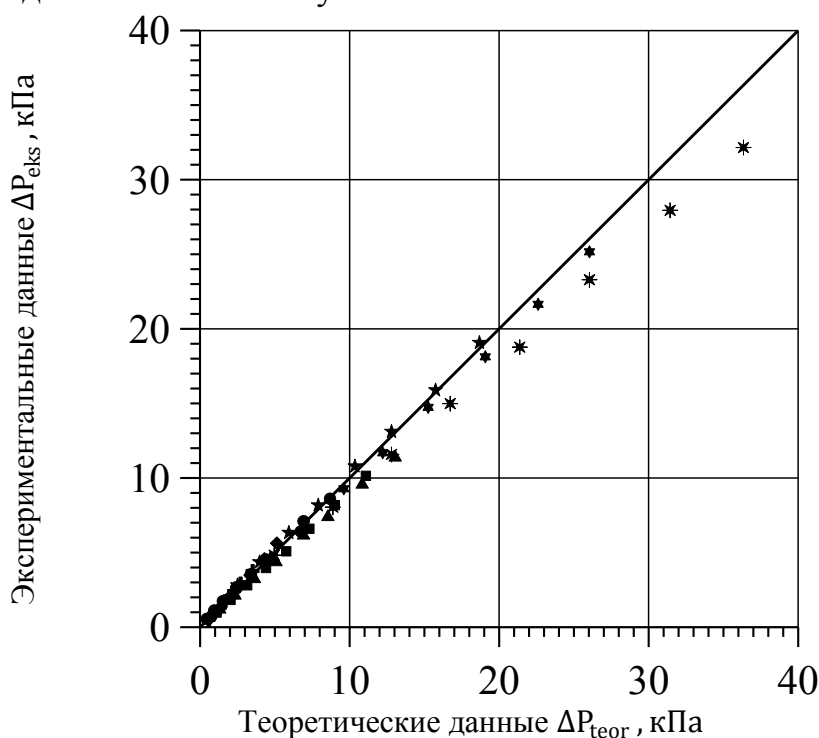


Рисунок 3.6- Сравнение экспериментальных и теоретически рассчитанных по зависимости (3.17) потерь давления в условно стационарном слое волокна хлопка (обозначения соответствуют рисунку 3.1)

Полученная в безразмерной форме расчетная зависимость числа Эйлера от числа Рейнольдса позволяет прогнозировать энергетические затраты, необходимые для создания перепада давления (при тех же гидродинамических условиях) при проектировании нового сушильного оборудования. Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления хлопкового волокна от числа Рейнольдса удобно использовать при эксплуатации сушильной установки в случае когда нужно изменить технологические параметры процесса, то есть изменить высоту слоя волокна хлопка или скорость фильтрации теплового агента. Погрешность между теоретически рассчитанными значениями и экспериментальными данными не превышает 13,2%, что вполне приемлемо для проектных расчетов нового сушильного оборудования [84-86].

## 4 МЕХАНИЗМ И КИНЕТИКА ФИЛЬТРАЦИОННОЙ СУШКИ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

### 4.1 Механизм фильтрационной сушки волокнистых материалов

Основными механизмами сушки являются поверхностная диффузия на поверхностях пор, диффузия жидкости или пара за счет разницы концентраций влаги и капиллярное действие в гранулированных и пористых материалах за счет поверхностных сил [95,96]. Как правило, гигроскопичные продукты высыхают с постоянной скоростью и последующими периодами падения скорости и сушка прекращается, когда устанавливается равновесие. Постоянная скорость периода сушки, физическая форма продукта и внешние условия, такие как температура, скорость сушильного воздуха, направление воздушного потока и относительная влажность воздуха, оказывают большое влияние на поверхность высушиваемого материала при поверхностной диффузии [97,98].

Когда поверхность твердых тел или частиц высыхает, и содержание влаги уменьшается до критического значения, начинается первый период снижения скорости. В отличие от периодов постоянной скорости, период падения скорости контролируется диффузией жидкости в результате разницы концентраций влаги и внутренних условий материала. Внутренние условия, такие как влажность, температура и структура материала, играют важную роль в периоды падения скорости. Затем это явление сменяется вторым падением скорости периодов сушки, а именно диффузией пара из-за разницы концентраций влаги, а также внутренними строениями материалов [99,100].

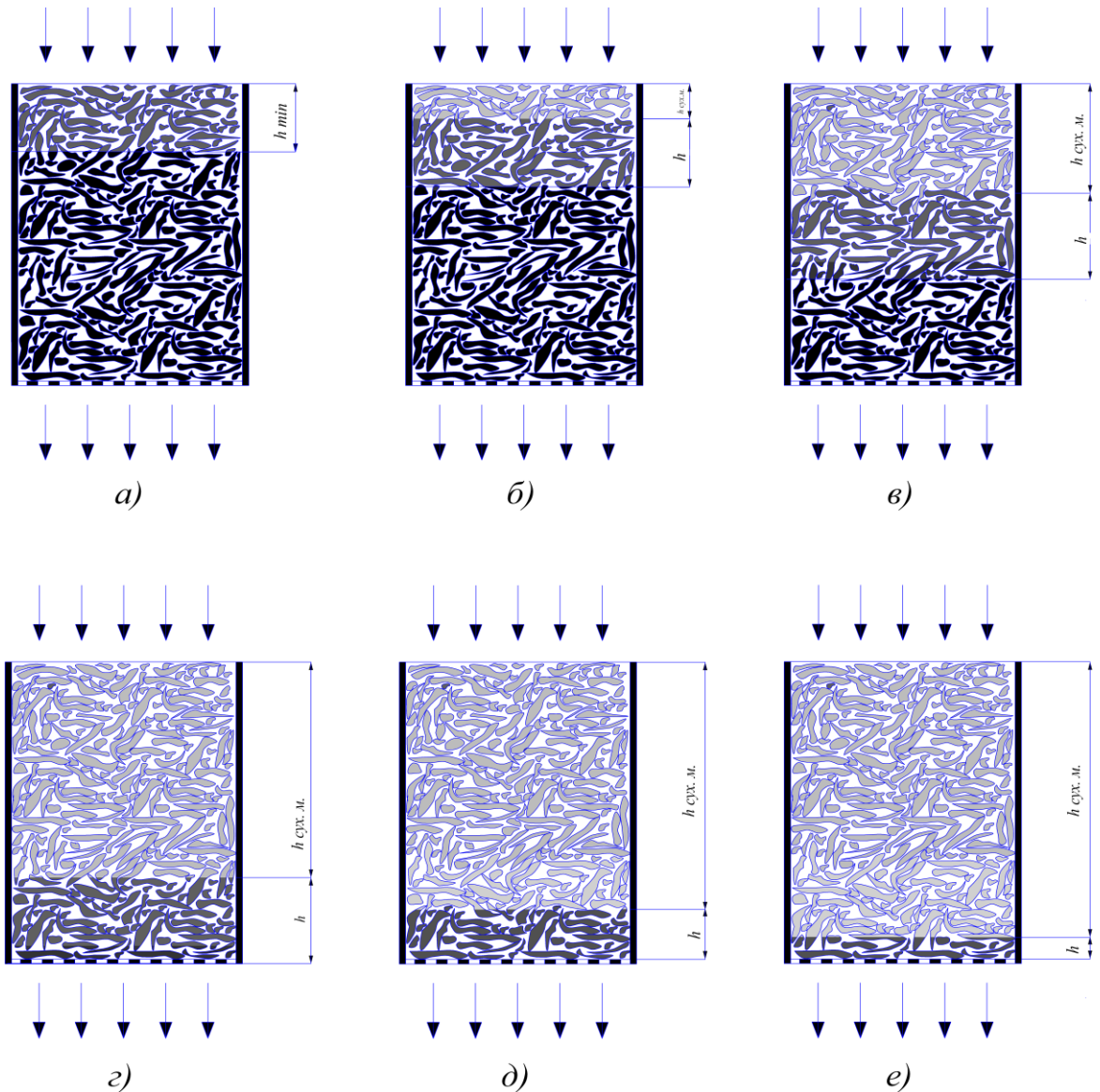
Принято считать, что процесс сушки органических веществ в период падения скорости контролируется механизмом диффузии жидкости или пара [99,101]. Однако к сушке пищевых материалов, как правило, применимы только теории капиллярной и жидкостной диффузии [102]. Диффузия является доминирующим физическим механизмом, управляющим движением влаги в материалах [103-105], которая зависит от влажности образцов [106]. Исследование процессов сушки проводят в сухих образцах, что более удобно при моделировании процесса [107,108].

Суть фильтрационной сушки заключается в фильтрации теплового агента сквозь пористую структуру волокнистого материала в направлении “слой материал – перфорированная перегородка” вследствие перепада давления.

Механизм фильтрационной сушки схематично изображен на рисунке 4.1.

Известно, что при фильтрационной сушке, аналогично, как в процессах ионного обмена, экстрагирования из твердой фазы, массообмен происходит не по всей высоте слоя [109], а лишь на некоторой высоте, которую называют фронтом массопереноса. Во время фильтрационной сушки в начале формируется фронт высотой  $h_{\min}$  (рисунок 4.1 а), на этой высоте тепловой агент, фильтруясь сквозь пористую структуру влажного слоя волокнистого материала, отдает свое тепло материалу, а сам насыщается влагой, если высота слоя является значительной, а влаги достаточно, то через некоторое время влагосодержание теплового агента достигает насыщения, вследствие этого его

температура уменьшается до температуры мокрого термометра. В дальнейшем тепловой агент под действием перепада давления продолжает фильтроваться сквозь пористую структуру слоя, но участия в массообмене он уже не принимает.



а) формирование фронта массопереноса высотой  $h_{min}$ ; б) одновременное существование сухого слоя  $h_{сух.м.}$  и влажного материала; в) перемещение зоны массообмена в направлении к перфорированной перегородке; г) достижение лобовой частью фронта массообмена перфорированной перегородки; д, е) уменьшение зоны массообмена и завершения процесса сушки.

Рисунок 4.1- Механизм фильтрационной сушки волокнистых материалов

После удаления внешней влаги с верхних слоев волокнистого материала фронт массообмена расширяется в направлении движения теплового агента. Это объясняется тем, что внешняя влага материала, который первым контактирует со свежим тепловым агентом, удаляется быстрее, чем из материала нижних слоев, где тепловой агент насыщенный влагой и его

сушильный потенциал меньше, поэтому через некоторое время в верхних слоях не остается внешней влаги и начинает испаряться внутренняя влага с верхних слоев материала, при этом скорость испарения зависит от коэффициента внутренней диффузии влаги из частиц волокна. Это обуславливает формирование фронта переноса влаги высотой  $h$  (рисунок 4.1 б). Через некоторое время в верхних слоях завершается испарение внутренней влаги и наступает равновесие между волокнистым материалом и тепловым агентом, появляется слой сухого материала  $h_{\text{сух. м.}}$ , который участия в массообмене не принимает (рисунок 4.1 в), а зона массообмена перемещается к перфорированной перегородке. После того, как лобовая часть фронта массообмена достигнет перфорированной перегородки (рисунок 4.1 г), ее высота  $h$  начинает уменьшаться, тепловой агент только частично насыщается парами влаги, и его температура на выходе из слоя начинает расти (рисунок 4.1 д, е).

Известно, что во многих трудах, посвященных фильтрационной сушке [56-63,110,111], для описания кинетики использовали понятие сушки в первом и втором условном периодах по аналогии с конвективной сушкой. Анализируя механизм фильтрационной сушки, приведенный на рисунке 4.1, делаем вывод, что весь процесс можно разделить на период полного насыщения теплового агента (рисунок 4.1 а – г) и период частичного насыщения теплового агента (рисунок 4.1 д–е), что в действительности соответствует физической сущности процесса.

Далее мы сосредоточимся на уравнениях, которые учитывают все основные внутренние механизмы переноса влаги и свойства волокнистого материала, подлежащего сушке, в том числе гигроскопичность или негигроскопичность. Предполагается, что коэффициенты конвективного тепло- и массообмена изменяются в зависимости от влажности поверхности.

Как уже упоминалось ранее, сушка волокнистых материалов предполагает одновременный тепло-и массообмен в многофазной системе. При сушке волокнистые материалы можно разделить на гигроскопичные и негигроскопичные. Для негигроскопичных волокнистых материалов поры различных размеров образуют сложную сеть капиллярных путей. Влага внутри пор, которая способствует потоку, называется свободной влагой. Однако влагу внутри очень тонких капилляров трудно вытеснить воздухом. Эта часть влаги известна как несвободная часть влаги (иногда ее называют связанная влага). Пустоты в волокнах соединены между собой и заполнены воздухом и определенным количеством свободной влаги. Когда волокнистый материал подвергается воздействию конвективного состояния поверхности, предполагается, что преобладают три основных механизма внутреннего влагопереноса: капиллярный поток свободной воды, движение связанной влаги и перенос пара [21 с.32].



## 4.2 Влияние высоты слоя волокон хлопка сырца на процесс сушки

На поверхности волокон хлопка-сырца содержится незначительное количество внешней влаги, которая быстро испаряется в период полного насыщения теплового агента. Важно определить, какой путь проходит тепловой агент до полного насыщения влагой и определить минимальную высоту слоя влажного материала  $h_{min}$ , где процесс происходит во внешне диффузионной части.

Приняв, что поверхность слоя волокон хлопка-сырца является достаточным для насыщения теплового агента влагой до состояния насыщения и все тепло теплового агента идет на испарение влаги, а также, что средняя температура теплового агента в зоне сушки изменяется по линейному закону и определяется как среднее арифметическое значение от начальной температуры теплового агента и температуры мокрого термометра по зависимости, приведенной в [10 с.139., 112], определяем минимальную высоту  $h_{min}$  слоя влажного материала:

$$h_{min} = \frac{2 \cdot v_0 \cdot \rho \cdot c}{\alpha \cdot \sigma} \quad (4.1)$$

Результаты расчета  $h_{min}$  в зависимости от фиктивной скорости теплового агента и температуры теплового агента  $t_0 = 60^\circ C$  представлены в таблице 4.1.

Как видно из таблицы 4.1, минимальная высота слоя влажного материала прямо пропорциональна фиктивной скорости фильтрации теплового агента и обратно пропорциональна коэффициента теплоотдачи и удельной поверхности материала, что не противоречит физическому содержанию процесса и подтверждается экспериментальным путем.

Таблица 4.1 -Значение минимальной высоты  $h_{min}$  слоя влажного материала, в зависимости от фиктивной скорости теплового агента  $v_0$

$v_0, \text{ м/с}$	0,645	0,909	1,596	1,94	2,10
$h_{min} \cdot 10^3, \text{ м}$	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14

Допустив, что влагосодержание теплового агента во влажном слое волокон хлопка-сырца изменяется по линейному закону, определим его значение как среднее арифметическое значение от начального влагосодержания в состоянии насыщения интенсивность сушки в этом случае можно рассчитать по уравнению:

$$\frac{dW}{d\tau} = \beta \cdot S \cdot h_{min} \cdot \sigma \cdot \left( \frac{x_{нас} - x_n}{2} \right) \cdot \rho \quad (4.2)$$

Через некоторое время в верхних слоях завершается испарение внутренней влаги и наступает равновесие между твердыми волокнами хлопка-сырца и тепловым агентом, появляется слой сухого материала (см. рис. 4.1 б), если высота слоя значительно больше, чем  $h_{min}$  фронт массоотдачи перемещается в направлении движения теплового агента. Учитывая то, что условия насыщения

теплового агента определяются скоростью его фильтрования, начальной температурой и влажосодержанием, высота фронта массоотдачи  $h$  до достижения перфорированной перегородки будет постоянной, а также и скорость его перемещения. Это дает возможность определить время формирования зоны массообмена, время перемещения зоны массообмена к перфорированной перегородке и, приняв допущение, что при изотермических условиях высота фронта массообмена возле перфорированной перегородки равна  $h_{мин}$ , рассчитываем время высушивания слоя влажного хлопка-сырца.

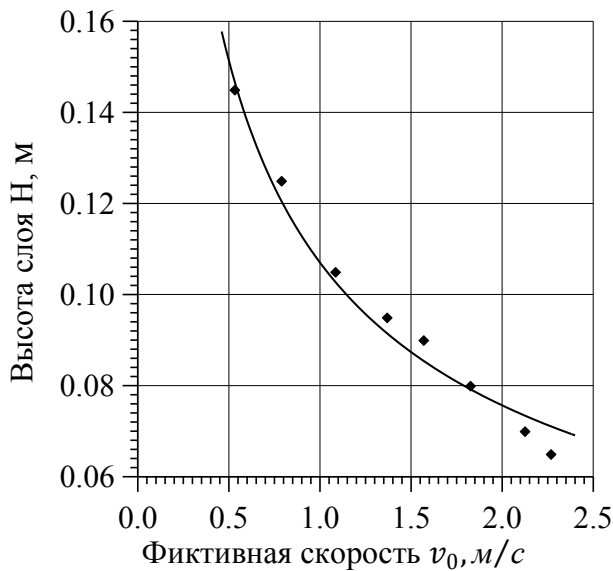


Рисунок 4.2- Зависимость высоты стационарного слоя хлопка от фиктивной скорости

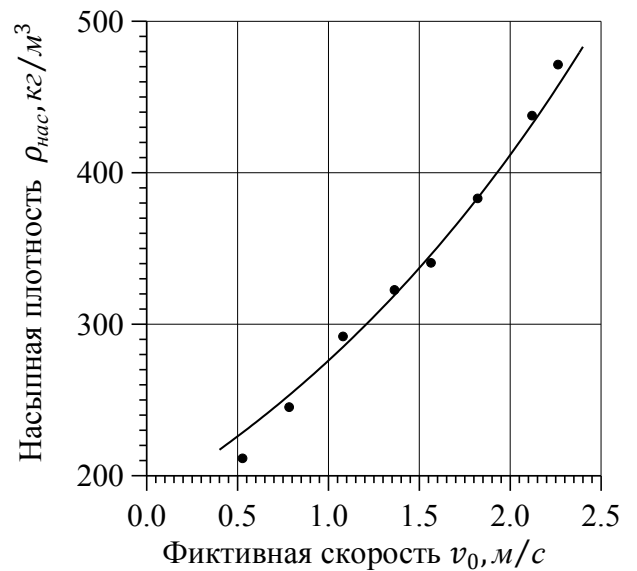


Рисунок 4.3- Зависимость насыпной плотности от фиктивной скорости

Как видно из рисунков 4.2 и 4.3 с увеличением скорости фильтрования теплового агента возрастает перепад давления, под давлением воздуха (теплового агента) высота слоя хлопка уменьшается, вследствие уменьшения высоты возрастает насыпной вес.

Насыпная плотность связана с высотой высушиваемого хлопка сырца следующей зависимостью [113]:

$$\rho_{нас} = \frac{G_{мат}}{V_{мат}} = \frac{G_{мат}}{S_k \cdot H} = \frac{4 \cdot G_{мат}}{(\pi \cdot d_k^2) \cdot H} \quad (4.3)$$

где  $G_{мат}$ -масса материала, кг;  $V_{мат}$ - объем занимаемый материалом, м<sup>3</sup>;  $S_k$ - площадь поперечного сечения контейнера, м<sup>2</sup>;  $d_k$ -диаметр контейнера, м;  $H$ - высота слоя материала, м.

В уравнении (4.3) высота слоя хлопка сырца обратно пропорционально к насыпной плотности, поэтому уменьшение высоты приводит к увеличению насыпной плотности, в свою очередь насыпная плотность хлопка сырца увеличивается с увеличением фиктивной скорости потока теплового агента, который можно увидеть на рисунке 4.3 .

В диапазоне увеличения скоростей от 0,5 до 1,5 м/с увеличение скорости ведет к сокращению времени сушки. При дальнейшем увеличении скорости фильтрования и соответственно перепада давлений время сушки начинает

увеличиваться. С увеличением скорости фильтрации рост скорости сушки увеличивается, с другой стороны, с изменением скорости фильтрования должна возрастать и скорость сушки. Однако в данном диапазоне параллельно растет и насыпная плотность хлопка сырца  $\rho_{\text{нас}}$  (рисунок 4.3), хотя и незначительно. С увеличением  $\rho_{\text{нас}}$  перекрывается активная поверхность массообмена волокон (особенно учитывая характер волокон поверхности по периметру волокна). Нарушается равномерность трения теплоносителя по поверхности, так как изменение  $\rho_{\text{нас}}$  по толщине материала в основном не одинаковая. То есть, отдельными каналами скорость будет больше в зонах с меньшей  $\rho_{\text{нас}}$  и меньше в зоне с большей  $\rho_{\text{нас}}$ , что и начинает негативно отражаться на сушке.

Как видно из рисунка 4.3, при  $v_0 > 2.0$  м/с  $\rho_{\text{нас}}$  начинает резко возрастать, что приводит к значительному взаимному экранированию поверхности, большому росту неравномерности фильтрования и в конечном результате к увеличению времени сушки. Это непосредственно оказывает влияние кинетике процесса фильтрационной сушки.

### **4.3 Экспериментальное исследование кинетики фильтрационной сушки волокон хлопка-сырца**

Экспериментальные исследования проводились на экспериментальной установке, изображенной на рисунке. 2.2, и согласно методике приведенной во второй главе настоящей диссертации.

При низкой относительной влажности, ниже 0,35, вода адсорбируется мономолекулярно многими природными волокнами. Исходя из термодинамических соображений, можно ожидать, что движение воды через одно волокно будет происходить со скоростью, зависящей от градиента химического потенциала. Между тем, влага оказывает глубокое влияние на физические свойства многих волокон. Гигроскопические волокна будут набухать по мере поглощения влаги и сжиматься по мере ее удаления. Волокна с высокой влажностью сначала теряют влагу, захваченную между волокнами, и только когда сами волокна высохнут, начнется усадка. Изменение объема при усадке обычно считается линейным с содержанием влаги. Установлено, что в гидрофильных материалах влага снижает жесткость и увеличивает ползучесть, вероятно, в результате пластификации [21, с. 17].

Изменения в содержании влаги могут увеличить ползучесть. Для описания движения влаги при равновесных относительных влажностях ниже единицы может быть применена идея сорбционной диффузии. Только те молекулы, кинетическая энергия которых превышает энергию активации связей влага-волокно, могут мигрировать из одного места в другое. Движущей силой сорбционной диффузии считается давление распространения, действующее на поверхности молекул в двумерной геометрии и аналогичное давлению пара, действующему в трехмерном пространстве [114].

Слой волокон хлопка-сырца характеризуется неправильной формой частиц и шероховатостью их внешней поверхности. Как сказано выше, степень перекрытия волокон хлопка-сырца принято  $K_p = 0,9$ , и, учитывая то, что

пористость слоя является достаточно большой  $0,990 \text{ м}^3/\text{м}^3$ , считали, что тепловой агент равномерно омывает волокна хлопка-сырца со всех сторон. Нами исследовалось влияние температуры  $t$ , скорости фильтрации теплового агента  $v_0$  и высоты слоя материала  $h$  на кинетику фильтрационной сушки. Результаты экспериментальных исследований приведены на рисунке 4.4, в виде кинетических кривых изменения влагосодержания  $w^c$  во времени  $\tau, c$ .

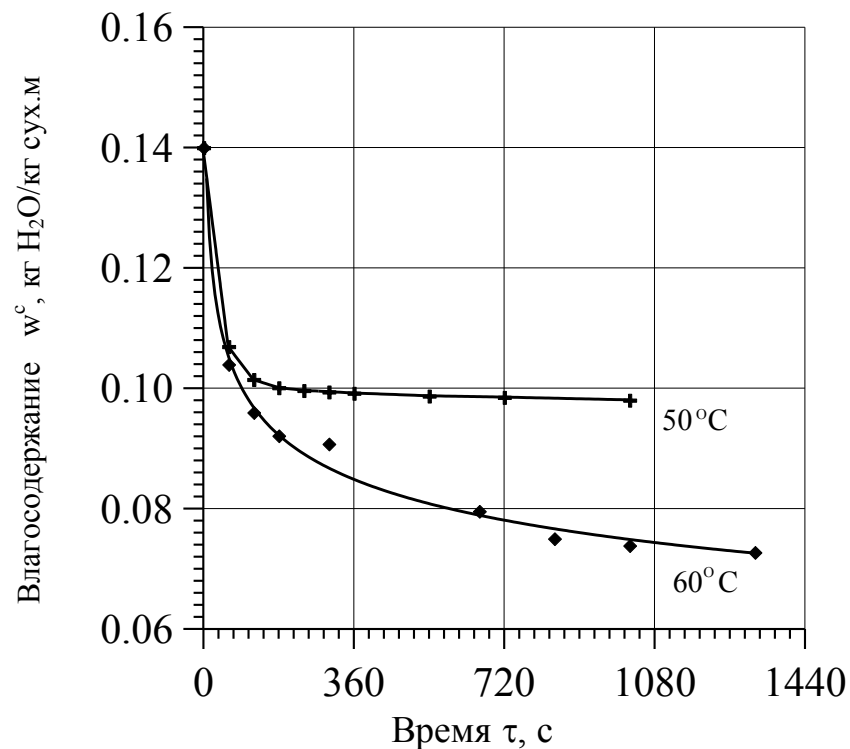
Начальная влажность волокон хлопка-сырца является высокой и зависит от многих факторов, в частности времени года, времени простаивания после уборки, типа почв, климатических условий и тому подобное. Основное количество влаги материала содержится внутри волокон хлопка-сырца только небольшое ее количество на поверхности волокна. Однако, как видим на кинетических кривых (рисунок 4.4), имеем период постоянной и падающей скорости сушки [94].

Итак, из приведенного нами механизма фильтрационной сушки (рисунок 4.1) до достижения фронта массообмена перфорированной перегородки имеем полное насыщение теплового агента парами влаги, а на кинетической кривой – прямую линию, тангенс угла наклона которой определяет скорость перемещения зоны массообмена (рисунок 4.4). Этот этап сушки в технической литературе называют первым условным периодом [21, стр 22], так и при фильтрационной сушке [62], однако это название не отражает физической сути процесса, потому что в контейнере находится одновременно сухой материал, материал, из которого удаляется внутренняя влага и материал, из которого удаляется внешняя влага (по направлению движения теплового агента). Поэтому, чтобы отразить физическую суть процесса, этот этап фильтрационной сушки целесообразно назвать периодом полного насыщения теплового агента.

По достижении фронтом массообмена перфорированной перегородки количество влажного материала уменьшается, и тепловой агент лишь частично насыщается парами влаги. Вследствие того, что определение изменения влагосодержания проводили весовым методом, на кинетических кривых изменение влагосодержания экспоненциально уменьшается и приближается к равновесию. Аналогично, как и в первом случае, этот этап целесообразно назвать периодом частичного насыщения теплового агента, и это название соответствует физической картине процесса фильтрационной сушки.

Из анализа кривых (рисунок 4.4) понятно, что увеличение температуры теплового агента позволяет внести в слой больше теплоты и соответственно испарить больше влаги. Рост температуры приводит к росту сушильного потенциала теплового агента и при одинаковой скорости фильтрации теплового агента рост температуры приводит к сокращению времени сушки. Как видим, тангенс угла наклона прямолинейного участка кинетических кривых с ростом температуры также возрастает [94].

Анализ графической зависимости (рисунок 4.4) показывает, что при одинаковой скорости и температуре теплового агента, то есть при одинаковом сушильном потенциале, тангенс угла наклона прямолинейных участков кинетических кривых зависит от высоты слоя и с ее ростом уменьшается.



Условия опытов:  $\omega_0 = 1,24 \text{ м/с}$ ,  $H = 160 \text{ мм}$ .

Рисунок 4.4- Кинетика фильтрационной сушки хлопка при разных температурах теплового агента

Разный угол наклона кинетических кривых (рисунок 4.4), объясняется тем, что изменение влагосодержания во время фильтрационной сушки определяли весовым методом и рассчитывали по отношению к массе сухого материала. Как видно из рисунка 4.4, при одинаковом начальном влагосодержании количество влаги в слое зависит от высоты слоя, и понятно, что с ростом высоты слоя возрастает масса сухого материала, поэтому угол наклона кинетических кривых уменьшается с ростом высоты слоя [94].

При сушке материалов растительного происхождения, в значительной степени влияют следующие факторы: время сушки, температура сушки, относительная влажность воздуха, скорость теплового агента, площадь поверхности, размер (толщина материала), объем и местное или парциальное давление [115]. Среди этих условий наиболее важными с точки зрения сушки являются толщина материала (размер) и температура сушки [116-118].

Так, в перечень вышеназванных факторов авторы Serqueira, N.E. и др. [119], включили скорость воздуха, конечное содержание влаги, сжатие или усадку продукта и особенности, связанные с сохранением и качеством продукта, в качестве наиболее влиятельных параметров.

Авторы работы [120] в процессе сушки установили, что скорость воздуха и относительная влажность являются наименее значимыми факторами, влияющими на кинетику сушки фруктов и овощей, в то время как температура и толщина являются факторами, наиболее влияющими на кинетику тонкослойной сушки фруктов и овощей. Но Gacula, M.C. и Singh, J. [121] показали, что температура оказывает большее влияние на константу сушки, чем

толщина. Однако взаимодействие между температурой и толщиной не оказало существенного влияния на величину константы сушки. Эти выводы были аналогичны выводам Ванга [122], который работал с картофелем.

Исходя из этих рассуждений, количество влаги, которая высушивается в периоде полного насыщения, зависит от высоты слоя. Понятно, что количество внешней влаги зависит от суммарной поверхности всех частиц слоя. Кроме этого, видно, что период полного насыщения теплового агента завершается, когда в слое остается примерно 0,011 кг H<sub>2</sub>O независимо от высоты слоя. Вышесказанное справедливо для всех высот слоя исследуемого материала. Существование периода неполного насыщения теплового агента мало зависит от высоты слоя и с его ростом незначительно возрастает. Таким образом, исследована кинетика фильтрационной сушки волокон хлопка-сырца, доказано, что скорость фильтрационной сушки мало зависит от высоты слоя материала, рассчитана минимальная высота, на которой тепловой агент полностью насытится влагой, и ее зависимость от скорости фильтрации теплового агента [94,123].

## **5 ТЕПЛОМАССОБМЕН ПРИ ФИЛЬТРАЦИОННОЙ СУШКЕ ВОЛОКНИСТОГО МАТЕРИАЛА**

Экспериментальные исследования проводились на экспериментальной установке, изображенной на рис. 2.2, и согласно методике приведенной во второй главе настоящей диссертации.

При фильтрационной сушке скорость движения теплового агента в порах и каналах стационарного слоя влажного материала определяет толщину пограничного слоя (гидродинамического, теплового и диффузионного) и соответственно значения коэффициентов тепло - и массоотдачи. Кроме этого поверхностью тепло - и массообмена является суммарная поверхность пор и каналов сквозь которые фильтруется тепловой агент. Скорость фильтрации теплового агента определяют исходя из технико-экономических соображений, учитывая то, что ее увеличение влияет на рост потери давления. Причем, действительная скорость движения теплового агента относительно элементов слоя значительно выше, чем в случае сушки любыми другими методами (в кипящем слое, во время сушки в пневмотранспортных сушилках и др). Большая поверхность тепло - и массообмена и скорость теплового агента в порах и каналах стационарного слоя влажного материала обеспечивают высокие коэффициенты тепло - и массоотдачи [53], и соответственно интенсивность фильтрационного способа сушки.

Интенсивность фильтрационной сушки волокнистых материалов в значительной степени зависит от количества теплоты, которая передается от теплового агента к влажной частице и определяется скоростью фильтрации теплового агента, разницей температур между поверхностью твердой частицы и тепловым агентом, а также поверхностью межфазного контакта.

Влага в частицах волокнистых материалов расположена в основном внутри и частично на поверхности. Во время сушки влага испаряется за счет подвода теплоты, а движущей силой процесса является разность температур между тепловым агентом и частицами материала.

Нами предлагается использование принципиальной схемы установки фильтрационной сушки барабанного типа для сушки хлопка-сырца (рисунок 2.4) [84].

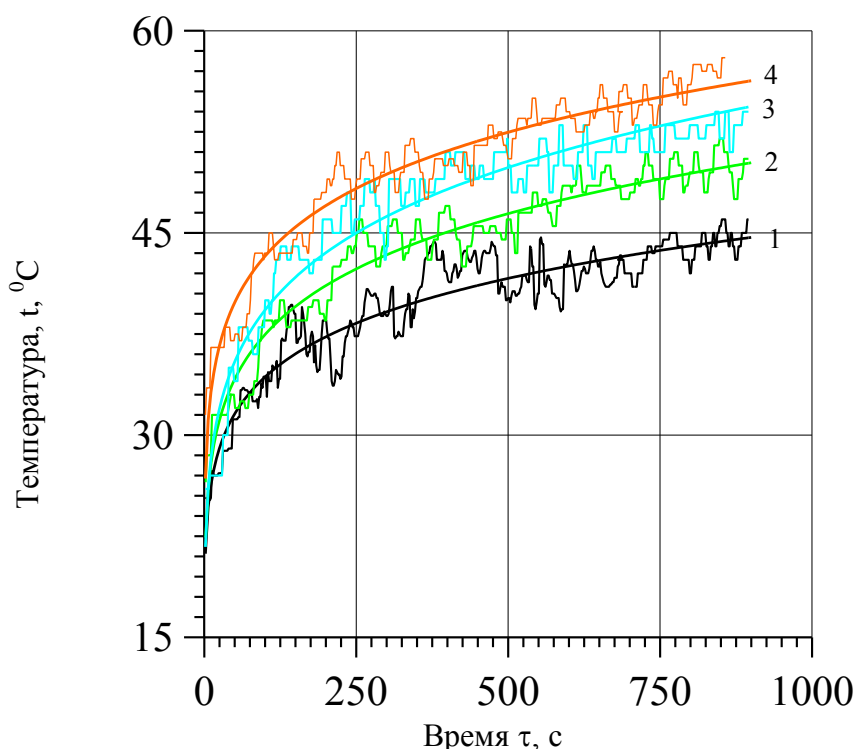
### **5.1 Внешний теплообмен между тепловым агентом и сухими частицами волокнистого материала**

Учитывая то, что при фильтрационной сушке в слое находится одновременно сухой и влажный материалы, которые принимают участие в теплообмене (сухой материал нагревается до температуры близкой к температуре теплового агента), необходимо исследовать процесс теплообмена между сухими и влажными частицами волокнистого материала.

Исследование теплообмена между тепловым агентом и сухими частицами волокнистого материала проводились на установке, изображенной на рисунке 2.1, и по методике, описанной в разделе 2. Как было сказано во втором разделе, температура на выходе из слоя 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 сухого волокнистого материала, которые приведены на рисунке 5.1, при различных температурах теплового агента, которая изменялась в пределах: 15 – 60 °С, и при различных скоростях движения теплового агента от 0,65 до 2,16 м/с. Значение температур теплового агента выбрано ввиду быстротечности процесса нагрева частиц волокнистого материала, усредненный диаметр которых не превышает 1 мм.

Представленные графические зависимости изменения температуры теплового агента на выходе из слоя материала позволяют определить коэффициент теплоотдачи от теплового агента в сухих частицах волокнистого материала.



1 –  $v_0 = 0,65$  м/с; 2 –  $v_0 = 0,96$  м/с; 3 –  $v_0 = 1,6$  м/с; 4 –  $v_0 = 2,16$  м/с

Рисунок 5.1- Изменение температуры теплового агента на выходе из слоя хлопка-сырца при различных скоростях движения теплового агента, (высота слоя материала 16мм)

Учитывая то, что тепловой агент фильтруется через слой волокнистого материала и порозность слоя является высокой ( $\varepsilon_m = 0,942 \div 0,990 \text{ м}^3/\text{м}^3$ ) принято допущение, что температура теплового агента одинакова со всех сторон частицы. Экспериментально измерить температуру поверхности частиц  $\bar{T}_n$  волокнистого материала невозможно, поэтому она оценивалась на основе аналитических зависимостей для средней температуры слоя и температуры на поверхности твердой частицы, приведенных в [124] для частиц цилиндрической формы. Вследствие того, что частицы материала омывались тепловым агентом со всех сторон, принимали, что распределение температурного поля по



диаметру частицы носит параболический характер. Среднюю температуру поверхности частиц волокон  $\bar{T}$  определяли из уравнения теплового баланса:

$$V_c \cdot \rho \cdot c \cdot (t_n - t_n) = \Delta Q = m \cdot c_s \cdot (\bar{T} - T_0), \quad (5.1)$$

где:  $m$  – масса навески волокнистого материала, кг;

$c_s$  – теплоемкость частиц волокнистого материала, кДж/(кг·К);

$\bar{T}$  – средняя температура слоя, °С;

$T_0$  – начальная температура волокон, °С.

$$\bar{T} = \bar{t} - \left( \bar{t} - T_0 \cdot e^{-\mu_n^2 \cdot Fo} \right) \cdot \left( 1 - \frac{r}{R} \right) \cdot e^{-\mu_n^2 \cdot Fo}, \quad (5.2)$$

где:  $\bar{t}$  – средняя температура теплового агента, °С;

$R, r$  – радиус частицы и текущий радиус соответственно ( $0 < r \leq R$ ), м;

$\mu_n$  – корень характеристического уравнения,

$Fo$  – критерий Фурье.

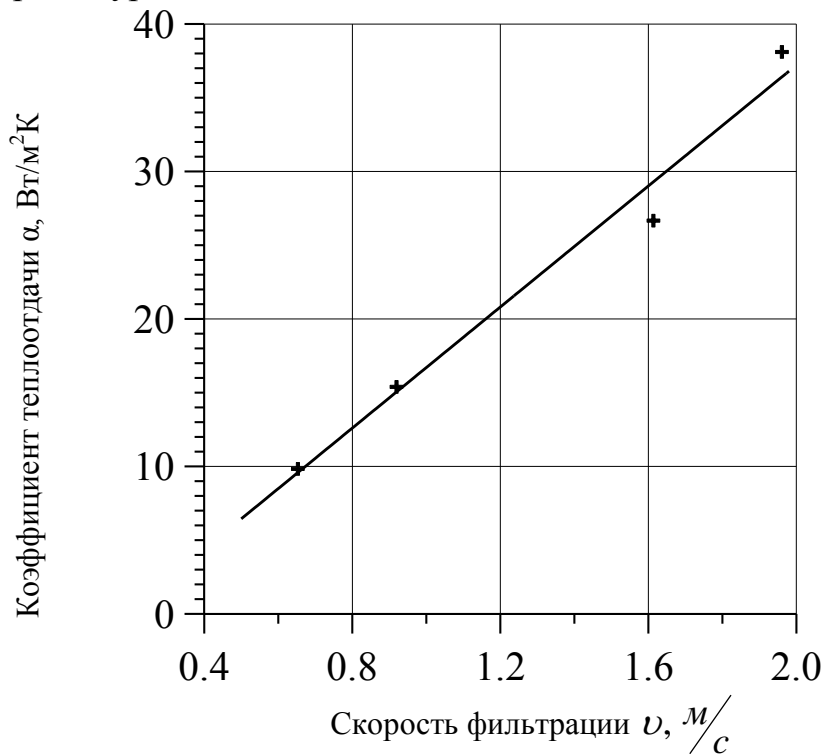


Рисунок 5.2-Зависимость коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  от действительной скорости фильтрации теплового агента сквозь слой сухого хлопка-сырца при температуре 60 °С

На основе экспериментальных значений, приведенных на рисунке 5.1, рассчитывали значения коэффициентов теплоотдачи  $\alpha$  согласно уравнению теплоотдачи [53]:

$$\alpha = \frac{\Delta Q}{F \cdot (\bar{t} - T_n) \cdot \Delta \tau}, \quad (5.3)$$

где:  $\Delta Q$  - рассчитывали согласно уравнению теплового баланса для теплового агента, Дж;

$\bar{t}$  - средняя температура теплового агента на выходе из слоя согласно экспериментальных данных, приведенных на рисунке 5.1, °С;

$F$  - эффективная поверхность тепло - и массообмена, м<sup>2</sup>;

$\Delta\tau$  - изменение времени, с.

Полученные нами значения коэффициента теплоотдачи являются усредненными по слою, в связи с тем, что тепловой агент движется по сложной траектории каналов между частицами, которые формируют слой материала, его скорость многократно изменяется по отношению к поверхности частиц, поэтому локальный коэффициент теплоотдачи изменяется. На рисунке 5.2 приведены расчетные значения коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  от действительной скорости движения теплового агента [93,94].

Как видно из графической зависимости, полученные нами экспериментальные значения коэффициента теплоотдачи от теплового агента в сухих частицах волокнистого материала  $\alpha$  в зависимости от действительной скорости фильтрации 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 тепла.

## 5.2 Обобщение результатов экспериментальных исследований коэффициента теплоотдачи для сухого слоя материала

Коэффициенты конвективного тепло-и массопереноса на поверхности волокнистых материалов являются важными параметрами в процессах сушки, они являются функциями скорости и физических свойств сушильной среды и в общем случае могут быть выражены в виде [21 с.31,53,125]:

$$Nu = A \cdot Re^n \cdot Pr^m, \quad (5.4)$$

$$Sh = A \cdot Re_e^n \cdot Sc^m, \quad (5.5)$$

где:  $Nu = \frac{\alpha \cdot d_e}{\lambda}$  - число Нусельта;

$Re_e = \frac{v \cdot d_e}{\nu}$  - число Рейнольдса;

$Pr = \frac{\nu}{a}$  - число Прандтля;

$Sh = \frac{\beta \cdot d_3}{D}$  - число Шервуда;

$Sc = \frac{\nu}{D}$  - число Шмидта.

$\nu$  - коэффициент кинематической вязкости, м<sup>2</sup>/с;

$a$  - коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;

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

$T$  – средняя температура поверхности частицы, °С.

$D$  – коэффициент диффузии водяного пара в воздух, м<sup>2</sup>/с;

Следует отметить, что для полностью увлажненной поверхности области тепло-и массообмена практически одинаковы, так что температура поверхности близка к температуре влажного термометра, для частично увлажненной поверхности эффективная площадь массообмена уменьшается с увеличением влажности поверхности [21 с.32].

М. Suzuki и S. Maeda [126] предложили модель коэффициента конвективного массопереноса, которая предполагала, что испарение происходит с прерывистой влажной поверхности, состоящей из сухих и влажных участков. Отношение влажной площади к общей площади поверхности уменьшается с уменьшением содержания влаги. Однако неясно, как изменяется доля влажной площади в зависимости от содержания поверхностной влаги. Кроме того, для гигроскопичных волокнистых материалов, когда доля влажной площади на поверхности приближается к нулю или содержание поверхностной влаги равно максимальному сорбционному значению, скорость испарения на поверхности волокон может быть не равна нулю [21 с.35].

Если исходная влажность волокнистого материала достаточно высока, то поверхность покрывается сплошным слоем свободной влаги и испарение происходит преимущественно на поверхности. Внутренний перенос влаги в основном обусловлен капиллярным потоком свободной влаги через поры. Поэтому скорость сушки определяется только внешними условиями, то есть температурой, влажностью и расходом конвективной среды, и будет наблюдаться постоянный период скорости сушки. По мере того как сушка продолжается, доля влажной области уменьшается с уменьшением содержания поверхностной влаги, так что коэффициент массопереноса уменьшается. Для того чтобы предсказать, как изменяется доля влажной площади в зависимости от содержания поверхностной влаги, необходимо ввести теорию перколяции [127]. Согласно теории перколяции, когда влага проходит через случайно распределенные пути в среде, существует порог перколяции, который обычно соответствует критическому содержанию свободного движения воды. Когда содержание свободной влаги больше критического, водная фаза является непрерывной. Для двумерной пористой среды это критическое значение составляет около 50% от содержания насыщенной свободной воды, а для трехмерной пористой среды – около 30%. Независимо от скорости внутреннего влагопереноса, до тех пор, пока содержание свободной влаги на поверхности меньше критического, поверхность будет образовывать прерывистые влажные пятна. Таким образом, коэффициент массопереноса уменьшается с увеличением поверхностного содержания свободной влаги и начинаются первые периоды снижения скорости. В первом периоде падения скорости на поверхности будет достигнут новый энергетический баланс, «сухие» волокна все еще содержат связанную воду, а давление пара на поверхности

определяется уравнением Клаузиуса-Клапейрона[21 с.31]. Когда содержание поверхностной влаги достигает своего максимального значения, свободной влаги уже не остается. Температура поверхности будет быстро повышаться, сигнализируя о начале второго периода падения скорости, в течение которого часто появляется отступающий фронт испарения, разделяющий систему на две области, влажную область и сорбционную область. Внутри фронта испарения материал влажный, то есть пустоты содержат свободную влагу, а основным механизмом переноса влаги является капиллярный поток. За пределами фронта нет свободной воды. Вся вода находится в сорбционном или связанном водном состоянии, и основными механизмами переноса влаги являются движение связанной влаги и перенос пара. Испарение происходит как на фронте, так и во всей области сорбции, в то время как пар течет через область сорбции к поверхности[21 с.33].

Поэтому, основываясь на определениях постоянной скорости, первой скорости падения и второй скорости падения периодов, характеристики большинства процессов сушки могут быть описаны математически [128].

Учитывая то, что физические параметры теплового агента изменяются в узком диапазоне температур (40 – 60 °С), в соответствии с рекомендациями, приведенными в [53], нами было принято, что:

$$Nu \sim Pr^{0,33}, \quad (5.6)$$

то есть  $m = 0,33$ .

Для определения неизвестных коэффициентов "А" и "n" в зависимости (5.4) экспериментальные значения представляли в логарифмической системе координат (рисунок 5.3) в виде зависимости [129]:

$$\frac{Nu}{Pr^{0,33}} = f(Re_e) \quad (5.7)$$

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

Определены из графической зависимости неизвестные коэффициенты А и n, для слоя волокнистого материала, которые представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1- Значение коэффициентов "А" и "n" в зависимости (5.4)

Re	А	n
20 ÷ 100	6,6·10 <sup>-3</sup>	1,17

Полученные нами значения коррелируют со значениями, полученными другими авторами, в частности приведенными в работе [10 с.177,130].

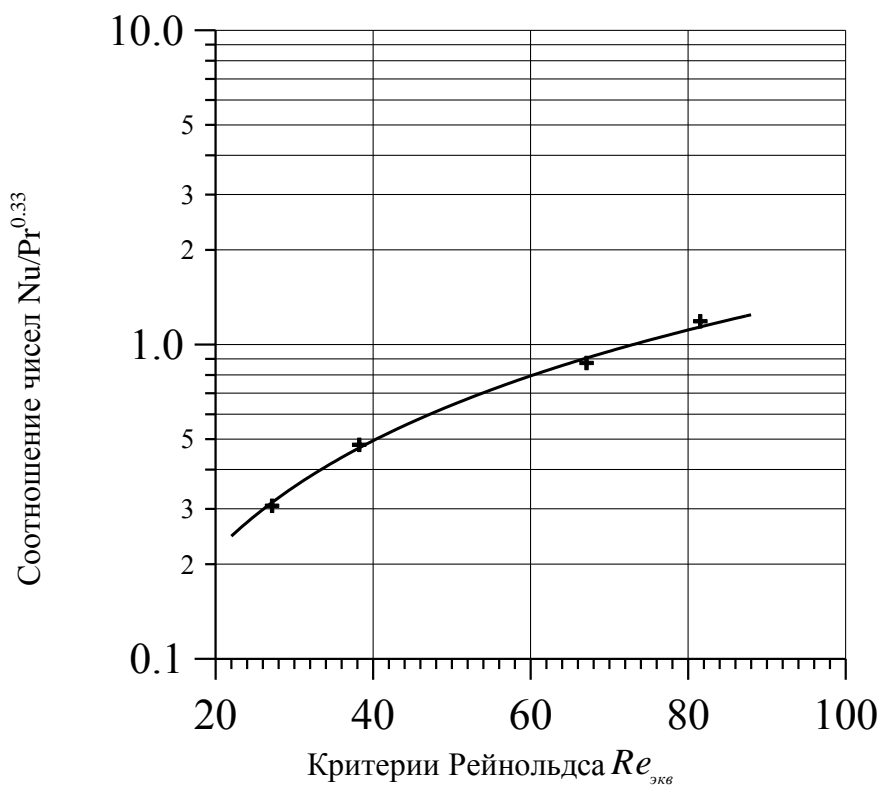


Рисунок 5.3-Зависимость  $Nu/Pr^{0.33}$  для короткого слоя материала  $H=160$  мм при температуре  $60^{\circ}C$

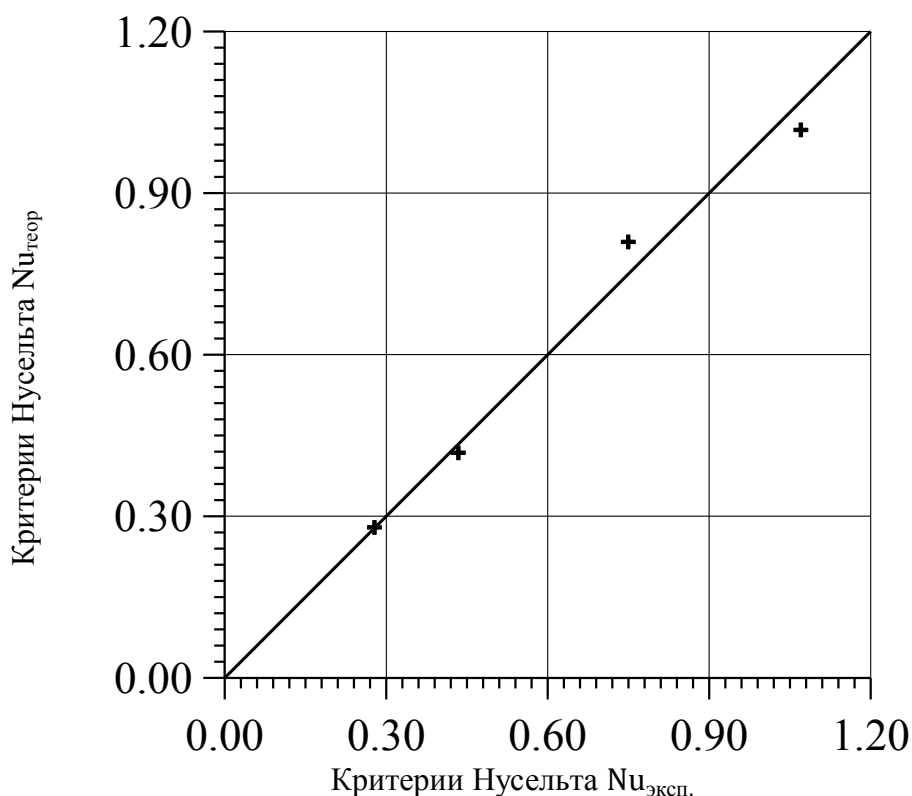


Рисунок 5.4-Результаты сравнения экспериментальных значений числа Нуссельта с теоретически рассчитанными значениями

Тогда уравнение (5.4) можно представить в виде:

$$Nu = 6,6 \cdot 10^{-3} \cdot Re_{экв}^{1,17} \cdot Pr^{0,33} \quad (5.8)$$

Полученные значения дают возможность прогнозировать значения числа Нусельта (а соответственно и рассчитать коэффициенты теплоотдачи при фильтрационной сушке волокон хлопка-сырца) с точностью  $\pm 9,0\%$  в пределах изменения числа Рейнольдса, указанных в таблице 5.1.

Результаты сравнения экспериментальных значений числа Нусельта с теоретически рассчитанными значениями приведены на рисунке 5.4.

### 5.3 Исследование тепло - и массообмена между влажными частицами волокнистого материала и тепловым агентом

Движение связанной воды, иногда известное как “перенос жидкой влаги вблизи сухости” или “сорбционная диффузия”, было изучено рядом исследователей [21, 131-133]

Показано, что перенос жидкой влаги все еще существует в области сорбции и является сильной функцией содержания свободной влаги. Уитакер и Чжоу [134] изучили конвективный перенос газовой фазы в сухой области, содержащей связанную влагу, и пришли к выводу, что в этой области может существовать поток жидкой влаги. Движение связанной влаги, однако, не может быть просто определено как диффузионный процесс, что часто создает путаницу при анализе переноса жидкой влаги в процессах сушки. Кроме того, измеренная проводимость связанной влаги сильно зависит от содержания влаги. Таким образом, движение связанной влаги может быть скорее обусловлено протеканием по очень тонким капиллярам или через клеточные мембраны [21 с.31].

При сушке поверхностной влаги с поверхности частиц волокнистого материала одновременно происходит передача тепла от теплового агента к поверхности высушиваемого материала и испарения влаги с поверхности частиц в тепловой агент [21 с.32]. Оба процесса относятся к конвективным: конвективный теплообмен и конвективный массообмен. Характерным для обоих процессов является зависимость плотности потока тепла или массы от разницы температур или концентраций (влажностенности).

Известно [23], что фильтрационная сушка носит зональный характер, поэтому исследование тепло - и массообмена влажного волокнистого материала также проводили в коротком слое, для того, чтобы весь слой материала принимал участие в процессе массообмена. Исследования проводили путем фильтрации теплового агента в направлении “влажный материал – перфорированная перегородка” в течение 20 с согласно методике, приведенной в разделе 2.

Коэффициент теплоотдачи и массоотдачи при фильтрационной сушке рассчитывали по следующим зависимостям [53, 130]:

$$\frac{\Delta W}{\Delta \tau} \cdot r = \alpha \cdot F \cdot \left( \frac{t_{ax} + t_{бвх}}{2} - t_{m.m} \right), \quad (5.9)$$

$$\frac{\Delta W}{\Delta \tau} = \beta \cdot F \cdot \left( x_{нас} - \frac{x_{нас} + x_0}{2} \right) \cdot \rho, \quad (5.10)$$

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

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

$\beta$  – коэффициент массоотдачи, м<sup>2</sup>/с;

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

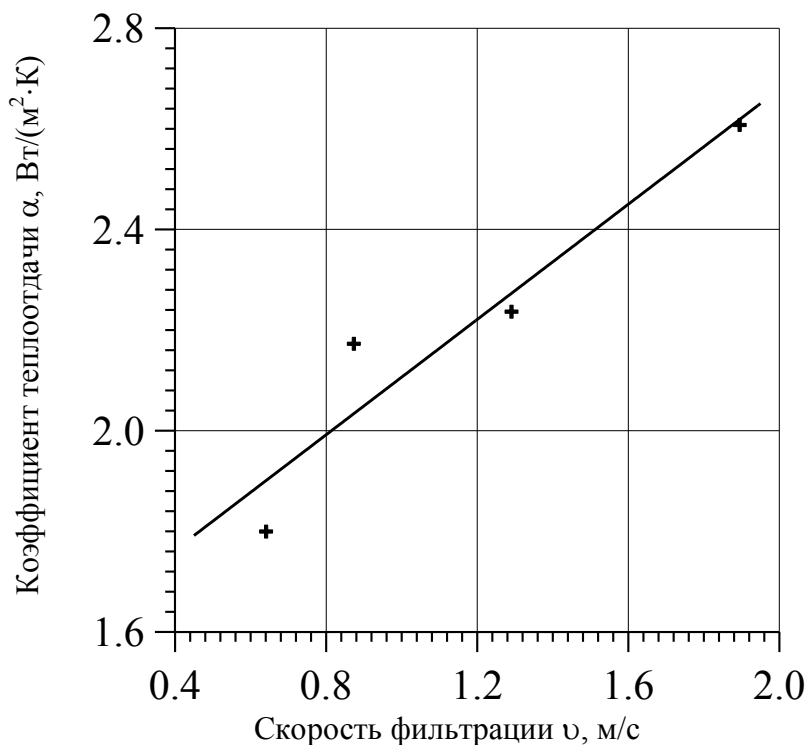


Рисунок 5.5-Зависимость коэффициентов теплоотдачи  $\alpha$  от действительной скорости фильтрации теплового агента  $v$  для влажного волокна хлопка-сырца

Рассчитанные нами коэффициенты теплоотдачи  $\alpha$  для влажного волокнистого материала по зависимости (5.9) от действительной скорости  $v$  представлены на рисунке 5.5.

Аналогично, как и для слоя сухого, так и влажного волокнистого материала коэффициент теплоотдачи линейно возрастает с ростом действительной скорости движения теплового агента, однако для влажного материала коэффициент теплоотдачи на 30% большим, чем для сухого материала, при одинаковых гидродинамических условиях, что объясняется лучшей теплопроводностью влажного материала. Полученные значения коэффициентов теплоотдачи для влажных частиц материала являются усредненными по слою.

А рассчитанные нами коэффициенты массоотдачи  $\beta$  по зависимости (5.10) от действительной скорости  $v$  движения теплового агента для влажного слоя волокнистого материала представлены на рисунке 5.6.

Аналогично, как и для сухих частиц волокнистого материала обобщения для влажного материала, проводили для теплообмена по уравнению (5.4) и массообмена по уравнению (5.5) [53].

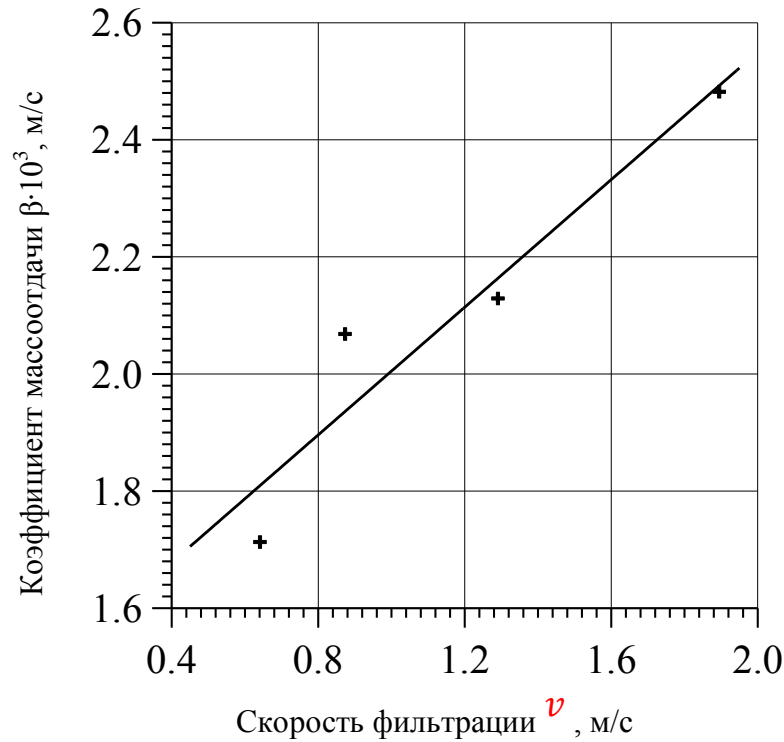


Рисунок 5.6- Зависимость коэффициентов массоотдачи  $\beta$  от действительной скорости теплового агента  $v$  для влажного волокнистого материала

Согласно рекомендациям [53], принимали, что:  $Sh \sim Sc^{0,33}$ , а  $Nu \sim Pr^{0,33}$ .

Для обобщения тепло - и массообмена результаты экспериментальных исследований представим на рисунках 5.7 и 5.8 в виде функциональных зависимостей  $\frac{Nu}{Pr^{0,33}} = f(Re_e)$  и  $\frac{Sh}{Sc^{0,33}} = f(Re_e)$ .

Неизвестные значения коэффициентов  $A$  и  $n$  определены из графической зависимости на рисунке 5.7, приведены в таблице 5.2, и они справедливы в пределах числа Рейнольдса  $10 \leq Re \leq 100$ .

Таблица 5.2- Значение коэффициентов "А" и "n" в зависимости (5.4) и (5.11)

$Re_e$	$A$	$n$
$10 \div 100$	$4,5 \cdot 10^{-2}$	0,1

Тогда зависимость (5.4) для влажного волокнистого материала будет иметь вид:

$$Nu = 4,5 \cdot 10^{-2} \cdot Re_e^{0,1} \cdot Pr^{0,33}, \quad (5.11)$$

А зависимость (5.5) для массообмена влажного волокнистого материала будет иметь вид:

$$Sh = 4,5 \cdot 10^{-2} \cdot Re_e^{0,1} \cdot Sc^{0,33} \quad (5.12)$$



Как видно из таблицы 5.2, для обоих случаев уравнение в безразмерных комплексах характеризуются одинаковыми показателями степени у числа Рейнольдса, что указывает на одинаковое влияние гидродинамики на эти коэффициенты.

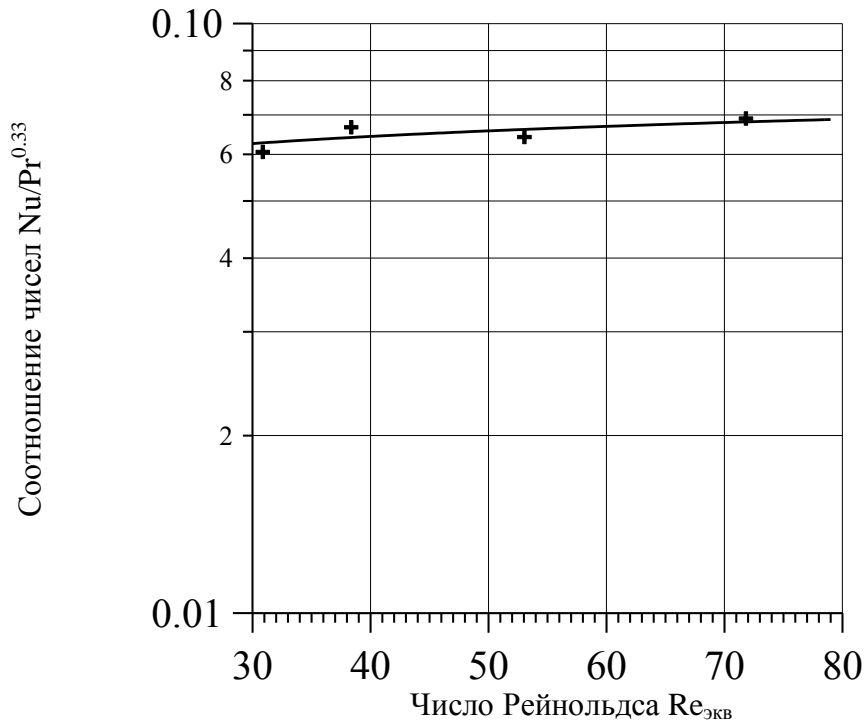


Рисунок 5.7-Обобщение теплообмена при фильтрационной сушке волокнистого материала

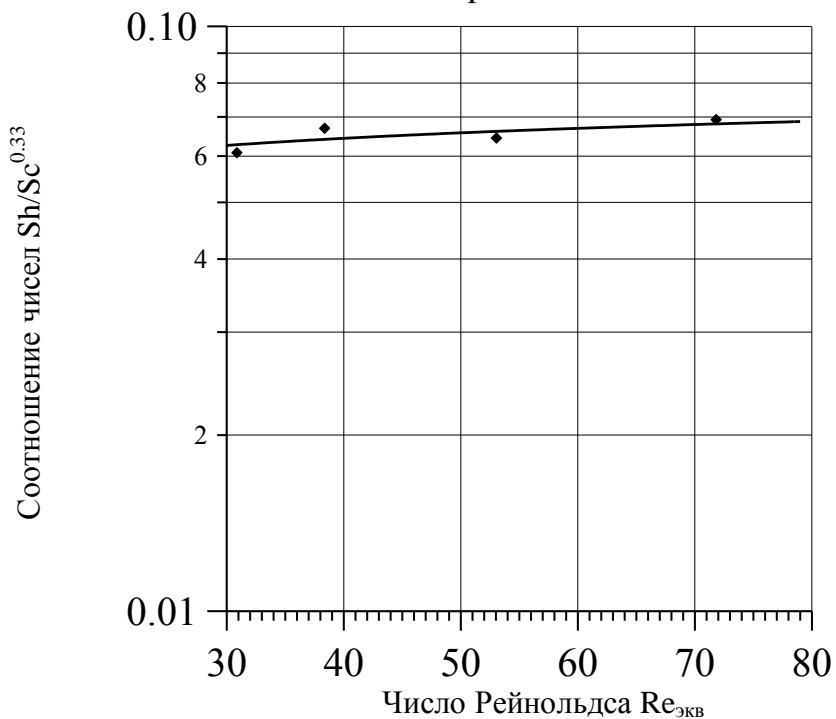


Рисунок 5.8-Обобщение массообмена при фильтрационной сушке волокнистого материала

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 рисунках 5.7 и 5.8 получена усреднением минимум 3-х экспериментов). Это соответствует утверждениям приведенных в работах [10, с.177, 75-78] и аналогичны уравнениям (1.25-1.27) и (1.29-1.31) полученными этими исследователями.

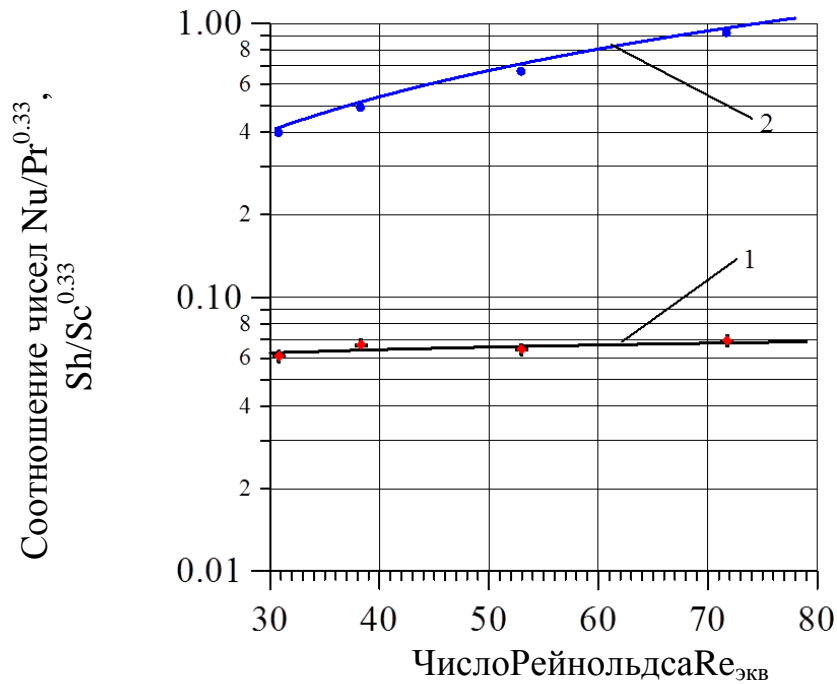
Приведенные зависимости (5.11) и (5.12) позволяют определить коэффициенты теплоотдачи и массоотдачи при фильтрационной сушке в стационарном слое для волокнистого материала в широких пределах изменения числа Рейнольдса ( $10 \leq Re \leq 100$ ) и прогнозировать затраты тепловой энергии на процесс фильтрационной сушки волокнистого материала и, соответственно, эксплуатационные затраты на этапе ее проектирования и установить экономическую целесообразность применения фильтрационного метода сушки.

#### 5.4 Аналогия между внешним теплообменом и массообменом в стационарном слое во время фильтрационной сушки

При фильтрационной сушке в первом периоде происходит одновременно передача тепла от теплового агента к поверхности высушиваемого материала и передача влаги с поверхности частиц к тепловому агенту. Оба процесса относятся к конвективным: конвективный теплообмен и конвективный массообмен. Характерным для обоих процессов является зависимость плотности потока тепла или массы от поверхности высушиваемого материала, разницы температур или концентраций (влажесодержания). Оба процесса характеризуются через коэффициенты теплоотдачи  $\alpha$  и массоотдачи  $\beta$ . Наибольшее влияние на их значение имеет гидродинамика, которая, как было сказано, оценивается числом Рейнольдса. В разделе обобщены экспериментальные данные по теплообмену и массообмену с помощью критериальных зависимостей. Из приведенных зависимостей видно, что для обоих случаев уравнения в обобщенных переменных аналогичны между собой, характеризующиеся одинаковыми показателями степени при числе Рейнольдса, что указывает на одинаковое влияние гидродинамики на коэффициенты теплоотдачи и массоотдачи Рейнольдса. В качестве примера приводим графическую зависимость  $\frac{Nu}{Pr^{0,33}} = f(Re)$  и  $\frac{Sh}{Sc^{0,33}} = f(Re)$  для исследуемых волокнистых материалов на одном графике (рисунок 5.9). Несмотря на разную природу теплообменных и массообменных процессов, которая оценивается числами Прандтля и Шмидта, определенные экспериментальным путем комплексы  $\frac{Nu}{Pr^{0,33}}$  и  $\frac{Sh}{Sc^{0,33}}$ , совпадают между собой при одинаковых числах Рейнольдса [129].

Для случая эксперимента, когда тепловой агент не полностью насыщается влагой, вследствие малости толщины слоя (20 мм) уравнение (5.5) можно записать в виде:

$$Sh = 1,5 \cdot 10^{-2} \cdot Re_e^{0,95} \cdot Sc^{0,33} \quad (5.13)$$



1 – тепловой агент полностью насыщен влагой, 2 – частично насыщен влагой (для случая эксперимента, когда тепловой агент не полностью насыщается влагой, вследствие малости толщины слоя (20 мм)).

Рисунок 5.9- Графическая зависимость  $\frac{Nu}{Pr^{0.33}} = f(Re)$  и  $\frac{Sh}{Sc^{0.33}} = f(Re)$  для исследуемых волокнистых материалов

С целью определения аналогии между этими процессами приравняем эти комплексы между собой равными:  $\frac{Nu}{Pr^{0.33}} = \frac{Sh}{Sc^{0.33}}$

или

$$\frac{\alpha \cdot d_e}{\lambda \cdot \left(\frac{\nu}{a}\right)^{0.33}} = \frac{\beta \cdot d_e}{D \cdot \left(\frac{\nu}{D}\right)^{0.33}} \quad (5.14)$$

откуда

$$\frac{\alpha}{c \cdot \rho} = \beta \cdot \left(\frac{a}{D}\right)^{0.67} \quad (5.15)$$

Учитывая то, что число Льюиса  $\frac{D}{a} = Le$ , вышеприведенную зависимость можно представить в виде:

$$\beta = \frac{\alpha}{c \cdot \rho} \cdot Le^{\frac{2}{3}} \quad (5.16)$$

Таким образом для первого периода фильтрационной сушки можем определить  $\beta$ , если известен коэффициент теплоотдачи  $\alpha$ .

Максимальное отклонение расчетных значений числа Нуссельта и числа Шервуда от экспериментальных данных не превышает 4 %.

## 6 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ И ВНЕДРЕНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННОЙ СУШИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

### 6.1 Рекомендации по проектированию фильтрационной сушильной установки

Применительно к фильтрационной сушильной установке нами предложены следующие рекомендации.

*Скорость теплового агента* рекомендуется выбирать в диапазоне:  $W_{\Gamma} = 0,6 \div 1,74$  м/с. Этот диапазон является наиболее устойчивым и эффективным.

*Температура теплового агента* рекомендуется выбирать при фильтрационной сушке хлопка сырца равной  $60^{\circ}\text{C}$ .

*Конструктивные параметры.* Минимальная высота сушильной зоны фильтрационной установки составляет 1,5-2м. Диаметр сушильного барабана 1,2-1,5м.

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

*Перфорация поверхности барабана.* 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.

### 6.2 Методики расчета фильтрационной сушильной установки

На основании проведенных исследований получены уравнения для определения гидродинамических и тепломассообменных характеристик фильтрационной сушильной установки, составляющих инженерную методику расчета.

Таблица 6.1 – Инженерная методика расчета фильтрационной сушильной установки

№ п/п	Рассчитываемые характеристики	Уравнение для расчета
1.	Гидравлическое сопротивление	(3.15) и (3.18 в критериальном виде) с учетом (3.12), (3.13)
2.	Коэффициент гидравлического сопротивления	(3.16) и (3.20 в критериальном виде)

3.	Порозность слоя	(3.17)
4	Минимальная высота $h_{\min}$ слоя влажного материала	(4.1)
5.	Насыпная плотность хлопка-сырца	(4.3)
6.	Коэффициент теплоотдачи сухого хлопка-сырца	(5.7)
7	Коэффициент теплоотдачи влажного хлопка-сырца	(5.11)
8	Коэффициент масоотдачи влажного хлопка-сырца	(5.12)
9	Живое сечение перфорированной перегородки каждого сектора вдоль зоны сушки [136,137]:	$S = 1,76 \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P_{пер.}}{10^4 \cdot \rho \cdot v^2}}$ где- $v$ скорость движения теплового агента м/с.
10	Рассчитывают необходимую общую высоту сушильной зоны и определяют диаметр барабана [136,137]:	$L_{общ.} = L + L_{зав.} + L_{выгрузки.} + L_{техн. обл.}$
11	Диаметр барабана [136,137]:	$D = \frac{L_{общ.}}{\pi}$
12	Частота вращения барабана [135,136]:	$n = \frac{m \cdot k \cdot L_б}{\tau_c \cdot D_б \cdot \operatorname{tg} \alpha}, \left[ \frac{об}{с} \right]$ Где $m = 1$ и $k = 0,7$ коэффициенты для прямоточной схемы
13	Производительность сушильной установки [136,137]:	$G = H \cdot A \cdot v_k \cdot \rho_{нас.}, \left[ \frac{кг}{с} \right]$ $H$ -высота слоя материала, м; $A$ – ширина перфорированного барабана, м;
14	Расход теплового агента [136,137]:	$q = L_{общ.} \cdot A \cdot v_0, \left[ \frac{м^3}{с} \right]$

### 6.3 Промышленные испытания и внедрение фильтрационной сушильной установки

Фильтрационная сушильная установка была внедрена в ТОО «Хлопкоперерабатывающий завод Мырзакент» в Туркестанской области. Фильтрационная сушильная установка показала свою высокую эффективность сушки (Приложение А).

На хлопкоперерабатывающем заводе согласно [138] в наличии имеются:

–не менее одного хлопкоприемного пункта;

–оборудование, предназначенное для осуществления технологических операций по первичной переработке хлопка-сырца в хлопок-волокно;

- весовое оборудование;
- вентиляционное оборудование;
- погрузочно-разгрузочные механизмы;
- средства пожаротушения;
- производственно-технологическая лаборатория для определения качества хлопка;

- специально отведенное место для хранения хлопка.

Технологический процесс сушки производится для подготовки хлопка-сырца к очистке, джинированию и линтерованию семян [138, с.1]. Сушильно-очистительный цех внезаводских и призаводских хлопкоприемных пунктов и очистительный цех хлопкозавода включают два комплекта сушильного оборудования с системами теплонаблюдения, транспортирования и питания хлопка-сырцом. Теплоснабжение сушилок осуществляется от теплогенераторов, работающих на жидком или на газообразном топливе. Теплогенераторы всех типов оснащены комплектом контрольно-измерительных приборов и автоматики безопасности. Газоход к сушилке является прямым (без изгибов) сечением 0,5 квадратных метров и длиной 8-10 метров и имеет растопочную трубу, компенсатор линейного (теплового) расширения и взрывной клапан. Система транспортирования и питания хлопка-сырцом обеспечивает последовательную и параллельную работу сушилок. Для нормального течения процесса сушки хлопка-сырца средства теплоснабжения хлопкосушильного оборудования отвечают следующим требованиям[138, с.3]:

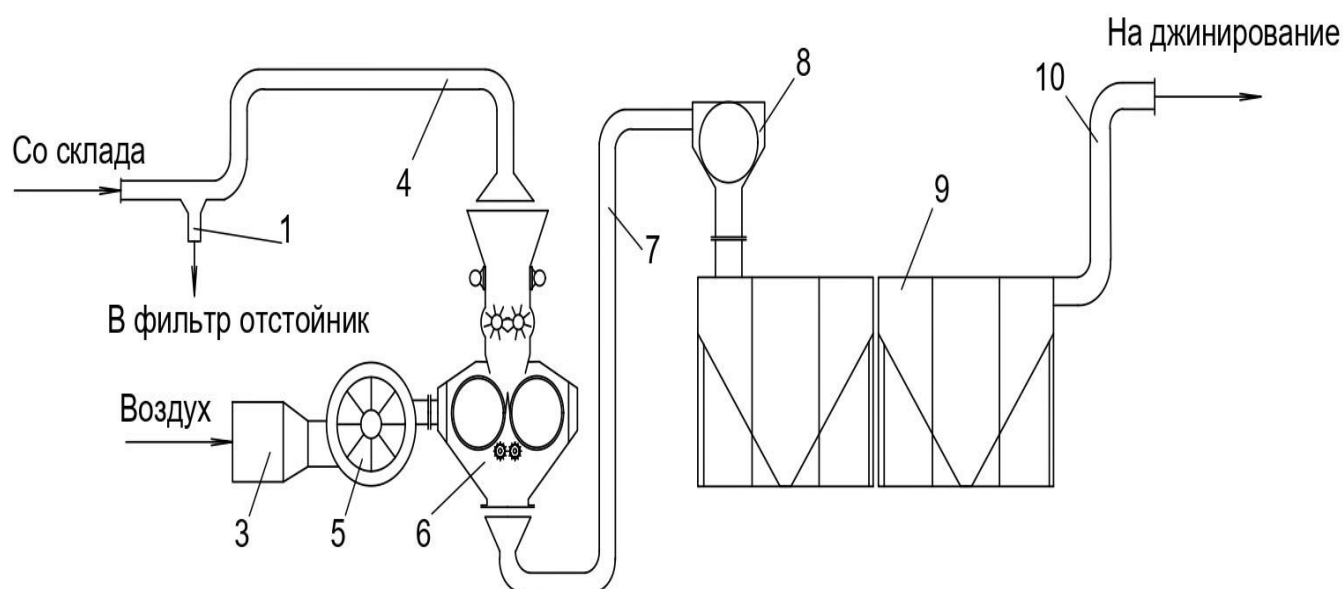
- все элементы и узлы теплогенераторов, подвергающиеся нагреву, теплоизолированы;
- жалюзи воздухозаборных окон на корпусе теплогенератора не ограничивает поступление необходимого (на смешение с продуктами сгорания топлива) атмосферного воздуха.

Режимы работы хлопкосушильного оборудования устанавливаются в зависимости от сорта, исходной и требуемой влажности хлопка-сырца, а также от производительности оборудования. В очистительный цех завода хлопок-сырец поступает на сушку с влажностью не выше 14 процентов. Для достижения оптимальных качественных показателей переработки трудноочищаемый хлопок-сырец в очистительном цехе хлопкозавода высушивается до влажности: первые сорта – 7,0-8,0, а низких сортов – 8,0-9,0 процентов. Пробы хлопка-сырца до и после сушки для проведения анализа на влажность отбираются через каждые два часа работы сушилок от каждой партии[138, с.2].

Для оценки экономической эффективности установки фильтрационной сушки хлопка сырца по сравнению с сушкой во вращающихся сушильных барабанах, которые эксплуатируются в промышленности в настоящее время, проведем при одинаковой производительности по готовому продукту (1000 кг/ч). Учитывая тот факт, что для большинства сушильных установок эксплуатационные затраты составляют около 90%, а капитальные- лишь 10%

[134], сравнивали только эксплуатационные затраты на процесс сушки как наиболее затратной стадии в себестоимости готового продукта.

На рисунке 6.1 представлена технологическая схема первичной переработки хлопка сырца хлопкоперерабатывающего завода.



1-фильтр-отстойник, 2-теплогенератор, 3-вентилятор, 4, 6,9-пневмотранспортная линия, 5-фильтрационная сушильная установка, 7-сепаратор, 8- очиститель;

Рисунок 6.1 – Технологическая схема первичной переработки хлопка сырца в ТОО «Хлопкоперерабатывающий завод Мырзакент»

Во время испытаний, проводимых совместно сотрудниками ЮКГУ им. М.Ауэзова и ТОО «Хлопкоперерабатывающий завод Мырзакент» (приложение А), получены данные исследований. Диапазоны изменения замеров основных параметров и сравнительные характеристики сушильного оборудования приведены в таблице

Прогнозируемый экономический эффект от внедрения фильтрационной сушки в производстве из расчета на 1000 кг сухого материала составляет по сравнению с сушкой в сушилке барабанного типа - 631,77 кВт·ч.

В результате проведенных испытаний подтверждена высокая эффективность применения фильтрационной сушки при первичной переработке хлопка-сырца.

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 волокнистых материалов» (Приложение Б, В).

Таблица 6.5 -Сравнение энергетических затрат на процесс сушки хлопка-сырца

Обозначение	Методы сушки	
	Фильтрационная сушка	Барабанная сушилка
1	2	3
$t_n, ^\circ C$	60	150
$t_k, ^\circ C$	25	80
$w_n^c, \text{ кг } H_2O/\text{ кг сух. м.}$	0,14	
$w_k^c, \text{ кг } H_2O/\text{ кг сух. м.}$	0,08	
$G, \text{ кг } H_2O$	747,57	
$D, \text{ м}$	1,5	1,6
$L_0, \text{ м}$	2	16
$n, \text{ об}/\text{ мин}$	1,5	3,64
$v_0, \text{ м}/\text{ с}$	1,74	0,7
$N_{\text{вен}}, \text{ кВт}$	6,58	2,07
$Q_{\text{кг.сух.м.}}, \text{ кДж}$	2750,14	4571,78
$Q_\Sigma, \text{ кВт} \cdot \text{ час}$	775,15	1406,92



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### **Краткие выводы по результатам диссертационных исследований.**

1. На основе анализа конструкций сушильных аппаратов обоснован выбор объекта исследований – фильтрационной сушильной установки, позволяющего проводить процесс сушки волокнистого материала-хлопка-сырца. Сформулированы задачи для проведения исследований и создания научно-обоснованных методов расчета.

2. Применительно к фильтрационной сушильной установке получены уравнения для определения удельной поверхности хлопка-сырца, их объемной порозности, а также уравнение для расчета ее эквивалентного диаметра.

3. Проведены исследования гидравлического сопротивления фильтрационной сушильной установки. Установлено, что численные показатели гидравлического сопротивления являются незначительными и применение фильтрационной сушильной установки может быть экономически оправдано в случае их использования для сушки хлопка сырца.

4. Проведены исследования гидродинамики фильтрационной сушильной установки и на основе полученных результатов выведено расчетное уравнение гидравлического сопротивления, учитывающее удельную поверхность хлопка-сырца, их объемную порозность, а также ее эквивалентный диаметр, который дает возможность прогнозировать потери давления в стационарном слое хлопка – сырца и соответственно энергетические затраты на процесс фильтрационной сушки.

5. Проведены исследования тепломассообменных характеристик фильтрационной сушильной установки и на основе полученных результатов выведены расчетные уравнения коэффициентов массоотдачи и теплоотдачи в критериальной форме и аппроксимацией экспериментальных данных определены коэффициенты пропорциональности.

6. Результаты исследований, полученные расчетные зависимости по гидродинамике и тепломассообмену положены в основу инженерной методики расчета фильтрационной сушильной установки и рекомендаций по проектированию и эксплуатации.

7. Разработана и внедрена фильтрационная сушильная установка на ТОО «Хлопкоперерабатывающий завод Мырзакент» в технологической схеме первичной переработки хлопка сырца в процессе сушки. При этом за счет снижения температуры сушильного теплового агента до 60 °С снижен расход электроэнергии за 1 тонну перерабатываемого хлопка до 631,77 кВт·ч.

**Оценка полноты решений поставленных задач.** Результаты теоретических исследований, экспериментальное изучение закономерностей фильтрационной сушки, гидродинамики и процессов тепломассообмена апробация в промышленных условиях полностью соответствуют поставленным в диссертации задачам.

**Разработка рекомендаций и исходных данных по конкретному использованию результатов.** Результаты экспериментального изучения

гидродинамики и процессов тепломассообмена в фильтрационной сушильной установке, разработанные инженерные методы расчета и рекомендации по проектированию промышленных аппаратов могут быть использованы инженерно-техническими работниками промышленных предприятий и научно-исследовательских организаций, а также в учебном процессе при чтении лекций, проведении практических занятий и лабораторного практикума.

Исходными данными по конкретному использованию результатов являются физико-химические свойства высушиваемого хлопка-сырца, методики инженерного расчета основных гидродинамических характеристик и параметров тепломассообмена, а также рекомендации по проектированию промышленных аппаратов, включающих выбор режимных и конструктивных параметров.

**Оценка технико-экономической эффективности внедрения.** По результатам проведенных исследований разработана конструкция промышленной фильтрационной сушильной установки, которая внедрена на ТОО «Хлопкоперерабатывающий завод Мырзакент» в технологической схеме первичной переработки хлопка сырца в процессе сушки. При этом за счет снижения температуры сушильного теплового агента до 60 °С снижен расход электроэнергии за 1 тонну перерабатываемого хлопка до 631,77 кВт·ч.

**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 тепломассообмена, 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 Лурье, М.Ю. Сушильное дело / М.Ю.Лурье.-изд.2-е, преработанное.- М.:ГОНТИР «Энергетическая литература»,1938.-385с.
- 2 Сажин, Б. С. Основы техники сушки / Б. С.Сажин.- М.:Химия, 1984.- 320с.
- 3 Лыков, А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. -изд.2-е, преработанное.–М.: Энергия,1968.-472с.
- 4 Mujumdar, Arun S. Handbook of Industrial Drying Fourth Edition/ Arun S. Mujumdar.- New York:LLC CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, an Informa business, 2015.-1334p.
- 5 Ажиметова, Г.Н. Мировой опыт и обзор развития хлопководства в Казахстане / Г.Н. Ажиметова // Современные проблемы науки и образования – 2011. - №1. – С.53-58.
- 6 Lv, N. Super hydro phobic/super oleophilic cotton-oil absorbent: preparation and its application in oil/water separation / N.Lv, X.Wang, S.Peng, L.Luo, R.Zhou // RSC Advances – 2018 -№8.-P.30257–30264. doi:10.1039/c8ra05420g
- 7 Иброгимов, Х.И. Термодинамические характеристики процесса дегидратации хлопка-сырца / Х.И. Иброгимов, К.М. Алимардонов, С.З. Зульфганов, А.Б. Бадалов // Технология текстильной промышленности, 2007. - № 4 - С. 19-22.
- 8 Болтабоев, С.Д. Сушка хлопка-сырца/ С.Д. Болтабоев, А.П. Парпиев–Ташкент: "Укитувчи", 1980.-84с.
- 9 Шайхов, Э. Т. Пахтачилик./ Э. Т.Шайхов, Н.Нормухамедов и др.-Ташкент: Мехнат, 1990.- 284 с.
- 10 Атаманюк, В.М. Наукові основи фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів. / В.М. Атаманюк, Я.М. Гумницький.- Львів: Видавництво Національного університету “Львівська політехніка”, 2013.-276с.
- 11 Автономов, А.И. Хлопководство / А.И. Автономов, М.З. Казиев, А.И. Шлейхер и др.: Учебники и учеб. пособия для высш. с.-х. учеб. заведений.- 2-е изд., перераб. и доп. –М.: Колос, 1983.- 334 с.
- 12 Максудов, И.Т. Справочник по первичной обработке хлопка/ И.Т. Максудов, А.Н. Нуралиев. –Ташкент: НПО «Хлопкопром»,1994.-565с.
- 13 Явчуновский, В.Я. Микроволновая и комбинированная сушка: физические основы, технологии и оборудование/ В.Я. Явчуновский.–Саратов: Изд-во Сарат.Ун-та, 1999. -213с.
- 14 Гинзбург, А.С. Технология сушки пищевых продуктов/ А.С. Гинзбург. – М.:Пищевая промышленность, 1976. -248с.
- 15 Кунилова, Т.М. Анализ существующих типов оборудования и технологий сушки/ Т.М. Кунилова //Процессы и аппараты пищевых производств,2008. -№1.-С.28-36.
- 16 Филоненко, Г.К. Сушка пищевых растительных материалов/ Г.К. Филоненко, М.А. Гришин, Я.М. Гольденберг и др. –М.: Пищевая промышленность, 1971. -440с.

17 Антипов, С.Т. Тепло- и массообмен при сушке в аппаратах с вращающимся барабаном/ С.Т. Антипов, В.Я. Валуйский, В. Меснянкин. //Воронеж. гос.технол.акад. –Воронеж, 2001. -308с.

18 Клямкин, Н.К. ИК - сушка – перспектива развития сушильной отрасли / Н.К.Клямкин // Техн. и оборуд. для села, 1999. –с. 20-21.

19 Нестеров, А.В. Сушка/ А.В.Нестеров: учеб. пособие.- С.-Пб.: Химия, 2016.- 75 с.

20 Варсонофьев В.Д. Вибрационная техника в химической промышленности/ В.Д. Варсонофьев, Э.Э. Кольман-Иванов: учеб. пособие.- М.: Химия, 1985.- 240 с.

21 Naghi, A.K. Heat and Masstransfer in Fibrous Materials: Theory and Applications/ A.K. Naghi, S. Thomas, L.A. Pothan //Publisher&Distrbutors.LTD.- New Deli,2009.-245р.

22 Хакимов, Ш.Ш. Сушильно-очистительный агрегат с системой рециркуляции сушильного агента / Ш.Ш.Хакимов, Е.А. Мирошников, П.Н. Бородин // Universum: Технические науки: электрон. научн. журн.- 2018.- № 1(46) . –С.4-6.

23 Ханик, Я.Н. Фильтрационная сушка плоских проницаемых материалов: дис. док. техн. наук: 05.17.08 / Ярослав Миколайович Ханик. – Львов, 1992. – 426 с.

24 Сажин, В.Б. Новая классификация диспесных материалов как объектов сушки / В.Б. Сажин, Б.С. Сажин, М.Б. Сажина // Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов): I Междунар. научно-практическая конференция – Москва, 2002. – Т. 3. – С.74-78.

25 Дерягин, Б.В. Поверхностные силы / Б.В. Дерягин, Н.В. Чураев, В.М. Муллер. – М.: Наука, 1985. – 400 с.

26 Лыков, А.В. Тепло-массообмен: [Справочник] – М.: Энергия, 1972. – 660 с.

27 Снежкин, Ю.Ф. Определение энергетических затрат при сушке коллоидных капиллярно-пористых материалов / Ю.Ф. Снежкин, Н.А. Дабижа, Р.А. Шапарь // Промышленная теплотехника. – 2003.– Т. 25.- № 4.– с.198-200.

28 Никитенко, Н.И. Энерго- и ресурсосберегающий способ сушки термолабильных материалов / Н.И. Никитенко, Ю.Ф. Снежкин, Н.Н. Сороковая // Промышленная теплотехника. – 2004.– Т. 26.- № 4.–с. 32-39.

29 Малезик, И.Ф. Конвективно-высокочастотная сушка косточковых фруктов / Малезик И.Ф., Тарлев В.П., Лупашко А.С. // ИТМ. –Кишенэу, 2005. – 472с.

30 Шапарь, Р.А. Исследование кинетики влогообмена при сушке яблок и яблочных выжимок. // Тепловые процессы в элементах энергетических устройств. – Киев: 1987.–с. 50 – 53.

31 Никитенко, Н.И. Математическое моделирование динамики процесса обезвоживания слоя диспергированного коллоидного капиллярно-пористого

материала / Н.И. Никитенко, Ю.Ф. Снежкин, Н.Н. Сорокова // Промышленная теплотехника. – 2006.– Т. 28.- № 3.– С. 29-37.

32 Снежкин, Ю.Ф. Кинетика и расчет тепломассобмена при сушке растительного сырья / Боряк Л.А., Шапарь Р.А. и др. // Тепломассобмен в капиллярно-пористых телах: Тез. Докл. Межд. Форума, секция 7. Минск, 1988. –с. 103 – 105.

33 Білей, П.В. Закономірності впливу режиму сушіння на кінетику процесу / П.В. Білей, І.А. Соколовський, Ю.Л. Безноско // Науковий вісник НЛТУУ, 2006. – Вип. 16.5. –с. 69-74.

34 Білей, П.В. Ентропійний метод дослідження теплової характеристики сушильної камери / П.В. Білей, Ю.Л. Безноско // Науковий вісник НЛТУУ, 2006. – Вип. 16.6. –с.124-128.

35 Білей, П.В. Сучасні тенденції удосконалення обладнання для сушіння пиломатеріалів / П.В. Білей, Ж.Я. Гуменюк // Науковий вісник УкрДЛТУ, 2004. – Вип. 14.4 – С.100-104.

36 Аксельруд Г.А. Гидродинамика фильтрационного процесса сушки / Г.А. Аксельруд, Я.Н. Ханик, В.И. Топчий // Инж. –физ. журн.,1986. –Т. 1.- №6. – С.959-963.

37 Ханик, Я.Н. Изучение гидродинамики при движении воздуха через крупнопористые газопроницаемые материалы / Я.Н. Ханик, Г.А. Аксельруд, С.Н. Балабан // Изв. вузов. Технология текстил. пром-сти,1988. –№3. -С.84-87.

38 Ханик, Я.М. Вивчення гідродинаміки при русі повітря через матеріал, розміщений на перфорованій перегородці / Я.М. Ханик, Я.М.Гумницький, В.М. Атаманюк, Н.Д. Довга //Науковий вісник. Проблеми деревообробного виробництва. Збірник науково-технічних праць. - Львів: УкрДЛТУ, 1995.- Вип. 3.1.- С.103-105.

39 Khanik, Y. Hydrodynamic and mass transfer in filtration drying process of chemical fibres / Y. Khanik, V. Atamanuk, L. Biletska. // XV Ogolnopolska konferencja naukowa inzynierii chemicznej i procesowej. Materialy konferencyjne. Wymiana ciepła, adsorpcja, suszeni.- Gdansk, 1995.- Т.ІІ. -Р.266–268.

40 Ханик, Я.М. Вивчення гідродинаміки при русі повітря через шар хімічного волокна/ Я.М. Ханик, Я.М. Гумницький, В.М. Атаманюк, М.П. Стрепко //Вісник ДУ ”Львівська політехніка” “Хімія, технологія речовин та їх застосування”.- Львів, 1994.- №285.- С.98-100.

41 Атаманюк, В.М. Гідродинаміка фільтраційного сушіння дисперсного матеріалу // Всеукраїнський наук.-техн. журнал. Промислова гідравліка і пневматика. – Вінниця, 2006. –№1 (11), –С. 12-17.

42 Ханик, Я.М. Особливості гідродинаміки та кінетики фільтраційного сушіння дисперсної кавової сировини / Я.М. Ханик, І.О.Гузьова, В.М. Атаманюк // Науковий вісник УкрДЛТУ: Збірник наук.-техн.праць. – Львів,2000. -Вип.10.2. –С.159-161.

43 Ханик, Я.М. Гідродинаміка фільтраційного сушіння кавової сировини для екстрагування жиру / Я.М. Ханик, І.О.Гузьова, В.М. Атаманюк // Хімічна промисловість України. –Київ,2001. –№5. –С.44-46.

44 Гузьова, І.О., Атаманюк В.М. Кінетика фільтраційного сушіння кавового шламу. Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій, 2012.- Т. 2.- Випуск 41.- С.75–80.

45 Кіндзера, Д.П. Вплив фракційного складу вугілля на гідродинаміку і кінетику сушіння у щільному шарі / Д.П. Кіндзера, Я.М. Ханик, В.М. Атаманюк // Вісник ДУ "Львівська політехніка". Хімія, технологія речовин та їх застосування. –Львів, 2002. –№461. –С.245-252.

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

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

48 Атаманюк, В.М. Гідравлічні закономірності роботи апаратів із стаціонарним шаром дисперсного матеріалу / В.М. Атаманюк, Р.В. Ходорівський, І.Р. Барна // Вісник Національного університету "Львівська політехніка", Хімія, технологія речовин та їх застосування. 2010, – №667.- С.253–258.

49 Колинз, Ю.Р. Течение жидкостей через пористые материалы / Юджин Роял Колинз; [пер. с англ. Р.Л. Сайганика. Под ред. Г.И. Баренблатта]. – М.: Мир, 1964. – 350 с.

50 Годес, О.М. Аппараты с кипящим зернистым флоем. / О.М. Годес, О.Б. Цитович // Гидравлические и тепловые основы работы. –Л.: Химия, 1981. –296 с.

51 Аэров, М.Э. Аппараты со стационарным зернистым флоем / Аэров М.Э., Годес О.М., Наринский Д.А. – Л.: Химия, 1979. – 176 с.

52 Аэров, М.Э. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым флоем / М.Э. Аэров, О.М. Годес. – Л.: Химия, 1968. – 510 с.

53 Гельперин, Н.И. Основные процессы и аппараты химической технологии: В двух книгах./ Н.И. Гельперин.– М.: Химия, 1981. – 812 с.

54 Романков, П.Г. Гидромеханические процессы химической технологии / П.Г. Романков, М.И. Курочкина– Л.: Химия, 1982. – 288 с.

55 Протодьяконов, И.О. Гидромеханические основы процессов химической технологии / И.О. Протодьяконов, Ю.Г. Чесноков.– Л.: Химия, 1987. – 360 с.

56 Ханьк, Я.Н. Изучение гидродинамики при движении воздуха через плоские газопроницаемые материалы / Я.Н. Ханьк, М.П. Стрепко, Я.М. Душа // Вестн. Львов. Политехн. Ин-та: Химия, технология веществ и их применение, 1989. –№231: –С.81-83.

57 Ханик, Я.Н. Гидродинамика в процессе фильтрационной сушки крупнопористых материалов / Я.Н. Ханик, М.П. Стрепко, С.Н. Балабан // Хим. технология, 1990. –№2(170). –С.47-50.

58 Ханик, Я.Н. Гидродинамическое сопротивление плоских газопроницаемых материалов / Я.Н. Ханик, В.И.Топчий, М.П. Стрелко // Приклад. химия, 1991. – №1. – С.107-110.

59 Ханик, Я.Н. Вплив структури на гідродинаміку при русі повітря через газопроникні об'єкти / Я.М. Ханик, М.П. Стрелко, Р.Реза // Вісн. Держ. ун-ту “Львів. політехніка”: Хімія, технологія речовин і їх застосування, 1993. – №261 – С.17-18.

60 Ханик, Я.М. Гідродинаміка фільтраційного сушіння піску / Я.М. Ханик, Аль-Ашкар Ясер // Хім. пром-сть України, 1996. – №6.- С. 33-37.

61 Дулеба, В.П. Гідродинаміка підчас руху повітря через шар сухого зернистого поліакриламідю / В.П. Дулеба, Я.М. Ханик, В.М. Атаманюк // Хімічна промисловість України, 1997.- №2.- С.16-19.

62 Ханик, Я.М. Гідродинаміка і кінетика процесу сушіння глини у щільному шарі під час ІЧ-нагрівання / Я.М. Ханик, Т.І. Римар, О.М. Креховецький // Науковий вісник. Збірник науково-технічних праць НЛТУУ. – 2006. - вип. 16.5. – С.74-78.

63 Атаманюк, В.М. Гидродинамика фильтрационной сушки зернистых материалов / В.М. Атаманюк, Я.Н. Ханик // Труды 1-ой между. научно-практ. конф. “Современные энергосберегающие тепловые технологии”, 2002. -Т.4. -С. 148-152.

64 Гинзбург, А.С. Теплофизические характеристики пищевых продуктов: Справочник/ А.С. Гинзбург, М.А. Громов, Г.И. Красовская.– М.: Агропромиздат, 1990. – 287с.

65 Рашковская, В.Е. Сушка в химической промышленности/ В.Е. Рашковская.– Л.: Химия, 1977. – 78с.

66 Касаткин, Л.Г. Основные процессы и аппараты химической технологий / Л.Г. Касаткин. – М.: Химия, 1971. – 783 с.

67 Fox, Barry (Mendel Co.) Granulation and drying of delicate products. / Barry (Mendel Co.), Fox.// Chemical Engineering, (USA), 2005. – Vol.112.- No.3. – P.35-38.

68 Mujumdar, Arun S. Research and Development in Drying: Recent Trends and Future Prospects / S. Arun Mujumdar // Drying Technology, 2004. - Vol. 22.- No. 1. – P. 1 – 26.

69 Wei, W. Physical Interpretation Of Solids Drying: An Overview On Mathematical Modeling Research / Wang Wei, Chen Guohua, S. Arun Mujumdar // Drying Technology, 2007. - Vol. 25.-No. 4. – P. 659 – 668.

70 Nesip, D. Heat and Mass Transfer Mechanisms in Drying of a Suspension Droplet: A New Computational Model / Nesip Dalmaz, Hilmi Onder Ozbelge, Ahmet Nedim Eraslan, Yusuf Uludag // Drying Technology, 2007. – Vol. 25. No. 2. – P. 391 – 400.

71 Mingheng, Shi. Investigation on Moisture Transfer Mechanism in Porous Media During Rapid Drying Process / Shi Mingheng, Wang Xin // Drying Technology, 2004. - Vol. 22.-No.1& 2. – P. 111 – 122.

72 Luis, A. Segura. Modeling at Pore-Scale Isothermal Drying of Porous Materials: Liquid and Vapor Diffusivity / A. Luis // *Drying Technology*, 2007. - Vol. 25.-No 10. – P. 1677 – 1686.

73 Kemp, Ian C. Modeling of particulate drying in theory and practice / Ian C.Kemp, David E. Oakley // *Drying Technology*, 2002. – Vol.20.-No.9. – P.1699-1750.

74 Аксельруд, Г.А. Массообмен в системе твердое тело-жидкость/ Г.А. Аксельруд.– Львов: изд-во Львов. ун-та, 1970. –185 с.

75 Лыков, М.В. Сушка в химической промышленности / М.В. Лыков. – М.: Химия, 1970. – 428с.

76 Сушильные аппараты и установки /Каталог.-М.: НИИХИММДШ,1988.-72с.

77 Мирошниченко, Г.И. и др. Оборудование и технология производства первичной обработки хлопка / Г.И. Мирошниченко и др.- Ташкент: Укитувчи, 1980.-327с.

78 Ульдяков, А.И. Сушка хлопка-сырца/ А.И. Ульдяков.- М.: Легкая индустрия, 1975.- 144 с.

79 Марупов, Р. Эффективные теплоемкость, теплопроводность и температуропроводность хлопка-сырца сорта 9326-в и его компонентов/ Р.Марупов, К.С.Мухиддинов, М.И.Салахутдинов// Доклады Академии Наук Республики Таджикистан,2006. -Том 49.- №7.-С.629-633.

80 Дульнев, Г.Н. Теплопроводность смесей и композиционных материалов/ Г.Н.Дульнев, Ю.П. Заричнян.- Л.: Энергия, 1974.- 264 с.

81 Мухиддинов, К.С. Теплофизические характеристики хлопка-сырца при различных интервалах температур / К.С. Мухиддинов, М.И. Салахутдинов, М.М. Сафаров //Материалы Международной конф. по физике конденсированного состояния и экологических систем, посв. 15-ой годовщине государственной независимости Республики Таджикистан. -Душанбе: ФТИ, 2006.- С.72-74.

82 Хусанов, А.Е. Результаты исследования свойств хлопка сырца многоцелевым растровым электронным микроскопом / А.Е. Хусанов, Д.Ж. Джанабаев, М.Б. Кенжеханова, А.К. Бухарбаева // Труды МНПК «Ауэзовские чтения-17: Новые импульсы науки и духовности в мировом пространстве». - Шымкент, 2019.-Т.7.-С.196-200.

83 Khussanov, A. Research of Properties of Raw Cotton –as the Object of Drying / A Khussanov, V. Atamanyuk, D. Janabayev, B. Kaldybaeva//2nd International Scientific Conference «Chemical Technology and Engineering», June 24–28th, 2019, Lviv, Ukraine. ISSN: 2664-1275 (Online).- P.223–224.

84 Khussanov, A.Ye. Results of experimental research of hydrodynamics of a stationary layer during filtration drying of raw cotton / A.Ye. Khussanov, V. M. Atamanyuk, B. M. Kaldybaeva, A. Zh. Abilmagzhanov, D. Zh. Janabayev, Zh. Ye. Khussanov// Bulletin of National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. 2020.-Vol.4 (386).-P.41–48. <https://doi.org/10.32014/2020.2518-1467.102>.



85 Atamanyuk, V. Hydrodynamics of Cotton Filtration Drying / V. Atamanyuk, Z. Gnativ, D. Kindzera, D. Janabayev, A. Khusanov, B. Kaldybaeva // Chemistry & Chemical Technology, 2020.- Vol. 14.- No. 3.-P. 426–432 <https://doi.org/10.23939/chcht14.03.426>.

86 Khussanov, A. Ye. Calculation of Hydraulic Resistance During Filtration Drying of Raw Cotton /A. Ye. Khussanov, V.M. Atamanyuk, B.M. Kaldybayeva, A. Zh. Abilmagzhanov, D.Zh. Janabayev, Zh.Ye. Khussanov // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan:Series Chemistry and Technology, 2020.- Vol. 3.-No. 441.-P.134 – 141. <https://doi.org/10.32014/2020.2518-1491.54>.

87 Зуева, Г.А. Экспериментальное исследование конвективной сушки льняного волокна / Г.А. Зуева, Г.Н. Кокурина, В.М. Дмитриев, Н.А. Зуев, В.А. Карасев// Химия и химическая технология,2011.-Том.54.-№12.-с.106-109.

88 Класен, П.В. Основные процессы технологии минеральных удобрений / П.В. Класен, И.Г. Гришаев – М.: Химия, 1990. – 304 с.

89 Kale, R. D. Extraction of Microcrystalline Cellulose from Cotton Sliver and Its Comparison with Commercial Microcrystalline Cellulose/ R. D. Kale, P. S. Bansal, V. G. Gorade // Journal of Polymers and the Environment.- 2017.- No. 26. PP. 355–364. doi:10.1007/s10924-017-0936-2.

90 Zeng, L. Macro scale porous carbonized polydopamine-modified cotton textile for application a selector dein microbial fuel cells / L. Zeng, S. Zhao, M.He //Journal of Power Sources, 2018.- No.376.- PP. 33–40. doi:10.1016/j.jpowsour.2017.11.071.

91 Wedin, H. Preparation of Viscose Fibres Stripped of Reactive Dyes and Wrinkle-Free Cross linked Cotton Textile Finish / H. Wedin, E.Niit, Z.A. Mansoor, A. R. Kristinsdottir, H.Dela Motte, C.Jönsson, C.Lindgren //Journal of Polymer sand the Environment. -2018.- No.6.- PP. 3603–3612. doi:10.1007/s10924-018-1239-y.

92 Cui, L. Hydrolysis and carbonization mechanism of cotton fiber sin subcritical water / L. Cui, S.Shi, W.Hou, Z.Yan, J.Dan //New Carbon Materials.- 2018.-No. 33.- PP. 245–251. doi:10.1016/s1872-5805(18)60337-3.

93 Janabayev, D.J. Filtration Drying of Cotton / D.J Janabayev, V.M. Atamanyuk, A.E. Khussanov , Z.Ya. Gnativ, B.M. Kaldybaeva //2nd International Scientific Conference «Chemical Technology and Engineering», June 24–28th, 2019, Lviv, Ukraine. ISSN: 2664-1275 (Online).-P.124 – 125.

94 Хусанов, А.Е. Кинетика фильтрационной сушки и изменение влагосодержания волокнистых материалов / А.Е.Хусанов, Б.М. Калдыбаева, В.М.Атаманюк, Д.Ж.Джанабаев, Н.С. Хусанов // Труды МНПК «Ауэзовские чтения-16: Четвертая промышленная ревалюция: новые возможности модернизации Казахстана в области науки, образования и культуры». - Шымкент, 2018.-Т. 8.-С. 206-210.

95 Inyang, U.E., Kinetic Models for Drying Techniques—Food Materials/ U.E. Inyang, I.O. Oboh and B.R. Etuk // Advances in Chemical Engineering and Science, 2018.-Vol.8.-P.27-48. <https://doi.org/10.4236/aces.2018.82003>.

96 Erbay, Z. A Review of Thin Layer Drying of Foods: Theory, Modeling, and Experimental Results / Z.Erbay and F.Icier // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2010.-Vol.50.-P.441-464. <https://doi.org/10.1080/10408390802437063>.

97 Srikiatden, J. Moisture Transfer in Solid Food Materials: A Review of Mechanism, Models and Measurements, / J. Srikiatden and J.S. Roberts // *International Journal of Food Properties* , 2007.-Vol. 10.-P. 739-777. <https://doi.org/10.1080/10942910601161672>.

98 Naderinezhad, S. Mathematical Modeling of Drying of Potato Slices in a Forced Convective Dryer Based on Important Parameters / S., Naderinezhad, N., Etesami, A.P. Najafabady and M.G. Falavarjani // *Food Science and Nutrition*, 2016.-Vol. 4.-P. 110-118. <https://doi.org/10.1002/fsn3.258>.

99 Pandey, S.K. Review of Mathematical Modeling of Thin Layer Drying Process / Pandey, S.K., Diwan, S. and Soni, R. // *International Journal of current Engineering and Scientific Research*, 2015.-Vol. 3.-P. 96-107.

100 Sahari, Y. Thin Layer Drying of Agricultural Products: A Review / Y. Sahari and R.H. Driscoli // 3-rd Malaysian Postgraduate Conference, Sydney, 4-5 July 2013.- P.8-21.

101 Panchariya, P.C. Thin-Layer Modeling of Black Tea Drying Process / P.C.Panchariya, D.Popovic and A.L. Sharma// *Journal of Food Engineering Davis*, 2002.-Vol.52.-P. 349-357. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(01\)00126-1](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(01)00126-1).

102 Saeed, I.E. Drying Characteristics of Roselle: Mathematical Modeling and Drying Experiments / I.E, Saeed, K.Sopian and Z.Z. Abidin // *Agricultural Engineering International : CIGR Journal*, 2008.- Vol.10.-P. 1-25.

103 Akpinar, E.K. Thin-Layer Drying of Red Pepper / Akpinar, E.K., Bicer, Y. and Yildiz, C. // *Journal of Food Engineering*, 2003. -Vol.59.-P.99-104. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(02\)00425-9](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(02)00425-9).

104 Doymaz, I. Air Drying Characteristics of Tomatoes / I.Doymaz // *Journal of Food Engineering*, 2007.-Vol.78.-P.1291-1297. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.12.047>.

105 Shanmugama, V. Experimental Investigation of Forced Convection and Desiccant Integrated Solar Dryer/ V. Shanmugama and E. Natarajan // *Renewable Energy*, 2006.-Vol. 31.-P. 1239-1251. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.05.019>.

106 Prachayawarakorn, S. Drying Kinetics and Quality Attributes of Low-Fat Banana Slices Dried at High Temperature/ S. Prachayawarakorn, W. Tia, N.Plyto and S. Soponronnarit // *Journal of Food Engineering*, 2008.-Vol. 85.-P. 509-517. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.08.011>.

107 Saeed, I.E. Drying Kinetics of Roselle (*Hi-biscus sabdariffa L.*): Dried in Constant Temperature and Humidity Chamber/ I.E. Saeed, K. Sopian and Z.Zainol Abidin // In: Muchtar, Ed., *Proceedings of SPS* , Permata, Bangi, S.D.E., Malaysia,2006.- P.143-148.

108 Togrul, Ý.T. Modelling of Drying Kinetics of Single Apricot/ Ý.T. Togrul and D.Pehlivan // *Journal of Food Engineering*, 2003.-Vol. 58.-P. 23-32. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(02\)00329-1](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(02)00329-1).

109 Романков, П.Г. Массообменные процессы химической технологии (системы с дисперсной твердой фазой)/ П.Г.Романков, В.Ф. Фролов–Л.: Химия, 1990. –384с.

110 Мосюк, М.І. Фільтраційне сушіння “енергетичноу” верби / М.І Мосюк, В.М Атаманюк, Д.П Кіндзера // Третій міжнародний молодіжний фестиваль наук. “Хімія та хімічні технології”. Матеріали ІІ Міжнародноу конференціу молодих вчених (ССТ – 2011), Україна, Львів, 2011, - с. 204- 205.

111 Atamanyuk, V. The Study of Hydrodynamic Processes at the Gas Flow Filtration Through the Candied Fruits Layer / V. Atamanyuk, I. Huzova, Z. Gnativ, B. Mykychak / Food science and technology: Reports on research projects «EUREKA: Life Sciences», 2016.- No. 4.-P.9-13.

112 Atamanyuk, V. Intensification of Drying Process During Activated Carbon Regeneration / V.Atamanyuk, I.Huzova, Z.Gnativ //Chem. Chem. Technol., 2018-Vol. 12.- No. 2.-P. 263–271.

113 Авербух, А.Я. Практикум по общей химической технологии: Уч.пособие/Под ред. И.П. Мухленова.-3-е изд. прераб. и доп..-М.: Высшая школа,1979.-421с.

114 Keeu, R.B. The Drying of Textiles/ R.B. Keeu // Rev. Prog. Coloration, 1993.-Vol. 23.-P. 57-72.

115 Chayjan, R.A. Modeling Some Drying Characteristics of High Moisture Potato Slices in Fixed, Semi Fluidized and Fluidized Bed Conditions/ R.A. Chayjan // Journal of Agricultural Science and Technology, 2012. –Vol. 14.-P. 1229-1241.

116 Meisamiasl, E. Determination of Suitable Thin-Layer Drying Curve Model for Apple Slices (Golab)/ E. Meisamiasl, S. Rafiee, A.Keyhani and A. Tabatabaefar // Plant OMICS, 2010.-Vol. 3.-P. 103-108.

117 Pandey, H. Experiments in Food Process Engineering/ H.Pandey, H.K. Sharma, R.C. Chauhan, B.C. Sarkar and M.B. Bera // CBS Publisher and Distributors PVT.- New Delhi, 2010.-P. 139-145.

118 Kumar, C. Modeling Heat and Mass Transfer Process during Convection Drying of Fruit / C. Kumar, A. Karim, M.U.H. Joardder and G.J. Miller// The 4th International Conference on Computational Methods, Gold Coast, 25-27 November, 2012.

119 Cerquera, N.E. Determination of the Drying Variables for Dehydration of Banana Pulp Sheets / Cerquera, N.E., Pastrana, E. and Castro, J.K. //ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 2017.-Vol. 12.-P. 160-167.

120 Onwude, D.I. Evaluation of a Suitable Thin Layer Model for Drying of Pumpkin under Forced Air Convection/ D.I. Onwude, N. Hanshim, R.B. Janius, N.M. Nawi and K. Abdan //International food Research Journal, 2016.-Vol. 23.-P. 1173-1181.

121 Gacula, M.C. Statistical Methods in Food and Consumer Research / M.C. Gacula and J.Singh //Applied Science.- London, 1984.- 505p.

122 Wang, N. Convective Drying: Modelling and Water Solid Interactions. / N. Wang //PhD Thesis, Department of Food Science and Technology, The University of Reading, Reading,1992.-123p.

- 123 Хусанов, А.Е. Фильтрационная сушка хлопка сырца-способ обеспечения качества/ А.Е.Хусанов, Д.Ж. Джанабаев, А.К. Бухарбаева // Труды МНПК «Ауэзовские чтения-18: Духовное наследия великого Абая» к 175-летию Абая Кунанбаева. - Шымкент, 2020.-Т.6.-С.321-325.
- 124 Лыков, А.В. Теория тепло- и массопереноса / А.В. Лыков, А.В. Михайлов Ю.А. – М.: ГЭИ, 1963. – 353с.
- 125 Keey, R.V. Drying: Principles and Practice/ R.V. Keey// 2nd edition, Pergamon Press, Oxford,1978.-358p.
- 126 Suzuki, M. On the Mechanism of Drying of Granular Beds, Mass Transfer from Discontinuous Source/ M. Suzuki and S. Maeda// J. Chem. Engng Japan, 1968.-Vol.1.-P.26-31.
- 127 Larson, R.G. Percolation Theory of Two-Phase Flow in Porous Media/ R.G. Larson, L.E. Scriven and H.T. Davis, // Chem. Engng Sci.,1981.-Vol. 36.-P. 57-73.
- 128 Chen, P. A Mathematical Model of Drying Processes/ P. Chen and D.C. Pei// Int J. Heat Mass Transfer, 1989.- Vol.32(2).-P.297-310.
- 129 Хусанов, А.Е. Внутридиффузионный массоперенос при фильтрационной сушке хлопка-сырца/ А.Е.Хусанов, В.М. Атаманюк, Б.М. Калдыбаева, Д.Ж. Джанабаев, Д. Жумадуллаев //Вестник КазННТУ,2020.- Vol. 142.-№. 6.-P.482 – 487.
- 130 Кунин, Д. Промышленное псевдооживление / Д. Кунин, О. Левеншпиль; [пер. с англ. под ред. М.Г. Слинько и Г.С. Яблонького.]. - М.: Химия, 1976. – 448 с.
- 131 Rotstein, E. Advances in Transport Phenomena and Thermodynamics in the Drying of Cellular Food Systems / E. Rotstein, //In Drying '86 : Edited by A.S. Mujumdar.- Hemisphere, Washington, 1986. -Vol. 1.-P. 1-11.
- 132 Rotstein, E. Influence of Cellular Membrane Permeability on Drying Behavior/ E. Rotstein and A.R.H. Cornish // J. Food Sci.,1978.-Vol. 43.-P. 926-934.
- 133 Bramhall, G. Sorption Diffusion in Wood/ G.Bramhall // Wood Sci., 1979.-Vol. 12.-P. 3-13.
- 134 Whitaker, S. Drying Granular Porous Media-Theory and Experiment/ S. Whitaker and W.T. Chou, //Drying Tech. Int. J., 1983.-Vol.1.-P. 3-5.
- 135 Муштаев, В.И. Сушка дисперсных материалов / В.И. Муштаев, В.М. Ульянов. – М.: Химия, 1988. – 352 с.
- 136 Атаманюк, В.М. Розрахунок обладнання для фільтраційного сушіння зернистих матеріалів / В.М. Атаманюк, Я.М. Ханик, І.О. Гузьова // Вісник НУ ” Львівська політехніка”. Хімія, технологія речовин та їх застосування. – Львів, 2003. - №488. – С.187-192.
- 137 Атаманюк, В.М. Розрахунок установки фільтраційного сушіння дрібнодисперсного вугілля після флотації / В.М. Атаманюк, Я.М. Ханик // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні: Ужгородський міжвідомчий наук.-техн. збірник. –Львів, 2005. - №39. – С.5–11.

138 Постановление Правительства Республики Казахстан от 26 декабря 2011 года № 1603 «Об утверждении Правил организации технологического процесса первичной переработки хлопка-сырца в хлопок-волокно». -12с.



## ПРИЛОЖЕНИЕ А

«УТВЕРЖДАЮ»  
Директор ТОО  
«Хлопкоперерабатывающий завод  
Мырзакент»  
Жабуов Е.М..  
20 06 г.  
печать

### 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 - 16-05-01 «Разработка  
методики конструирования и расчета высокоэффективных теплообменных  
аппаратов и устройств общепромышленного назначения» «Реконструкция  
аппаратурного оформления технологической схемы сушки хлопка-сырца,  
ВЫПОЛНЕННОЙ работниками ТОО «Хлопкоперерабатывающий завод  
Мырзакент» и ЮКГУ им М.О.Ауезова,  
ПРОВОДИМОЙ в период 01.03.2020г. по 31.08.2020г.

ВНЕДРЕНА на ТОО «Хлопкоперерабатывающий завод Мырзакент»

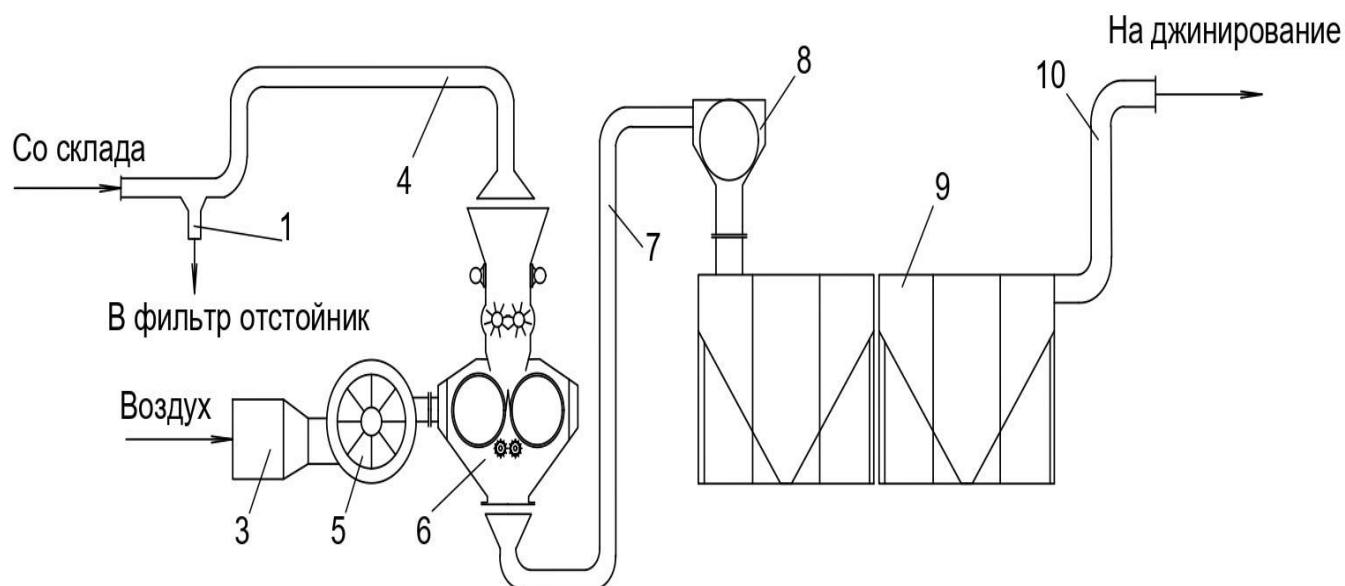
1. Вид внедряемых результатов: техническая документация на конструкцию  
фильтрационной сушильной установки для сушки хлопка-сырца.
2. Характеристики масштаба внедрения: единичное.
3. Форма внедрения: промышленная установка.
4. Новизна результатов научно-исследовательских работ: сравнительно новое решение  
конструкции фильтрационного сушильного аппарата для сушки хлопка-сырца  
установленный в подготовительном цехе первичной переработки хлопка-сырца позволило  
значительно повысить эффективность процесса.
5. Опытно-промышленная проверка: промышленные испытания фильтрационного  
сушильного аппарата для сушки хлопка-сырца, установленного для первичной  
переработки хлопка-сырца в подготовительном цехе в период с 01.03.2020г. по  
31.08.2020г.
6. Внедрен: Фильтрационный сушильный аппарат для сушки хлопка-сырца.
7. Фактический годовой экономический эффект: За счет снижения температуры  
сушильного теплового агента до 60 °С снижен расход электроэнергии за 1 тонну  
перерабатываемого хлопка до 631,77 кВт·ч.
8. Объем внедрения: одна технологическая линия.
9. Социальный и научно-технический эффект: снижение расхода электроэнергии,  
повышение качества высушиваемого хлопка-сырца, улучшение условий труда.

ПРИЛОЖЕНИЕ: Акт промышленных испытаний.

От ТОО «Хлопкоперерабатывающий завод Мырзакент» Гл. специалист Инженер Начальник цеха	от ЮКГУ им. М.Ауезова Научный руководитель: Исполнители:
Джорабеков Н.Ж. Пулатов А.А. Бекбаев Н.М.	Хусанов А.Е. Джанабаев Д.Ж. Калдыбаева Б.М.

Таблица 1 -Сравнение энергетических затрат на процесс сушки хлопка-сырца

Обозначение	Методы сушки	
	Фильтрационная сушка	Барабанная сушилка
1	2	3
$t_n, ^\circ C$	60	150
$t_k, ^\circ C$	25	80
$w_n^c, \text{ кг } H_2O/\text{ кг сух. м.}$	0,14	
$w_k^c, \text{ кг } H_2O/\text{ кг сух. м.}$	0,08	
$G, \text{ кг } H_2O$	747,57	
$D, \text{ м}$	1,5	1,6
$L_0, \text{ м}$	2	16
$n, \text{ об}/\text{ мин}$	1,5	3,64
$v_0, \text{ м}/\text{ с}$	1,74	0,7
$N_{\text{вен}}, \text{ кВт}$	6,58	2,07
$Q_{\text{кг.сух.м.}}, \text{ кДж}$	2750,14	4571,78
$Q_\Sigma, \text{ кВт} \cdot \text{ час}$	775,15	1406,92



1-фильтр-отстойник, 2-теплогенератор, 3-вентилятор, 4, 6,9-пневмотранспортная линия, 5-фильтрационная сушильная установка, 7-сепаратор, 8- очиститель;  
 Рисунок 1 – Технологическая схема первичной переработки хлопка сырца в ТОО «Хлопкоперерабатывающий завод Мырзакент»



## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Согласовано:  
Проректор по НР и И  
Сулейменов У.С.  
(Ф.И.О., подпись)  
« 05 » 11 2020г.

Ф.7.07-14  
Утверждаю  
Проректор по У и УМР  
Абишева Р.Д.  
(Ф.И.О., подпись)  
« 05 » 11 2020г.

АКТ № 313 от 23.11.20

внедрения результатов научных исследований по диссертации Джанабаева Д.Ж. на тему «Разработка и расчет процесса фильтрационной сушки материалов волокнистой структуры» на соискание ученой степени PhD, выполненной в соответствии с госбюджетной НИР Б-16-05-01 «Разработка методики конструирования и расчета высокоэффективных теплообменных аппаратов и устройств общепромышленного назначения».

Текстиль, нетканые и другие волокнистые материалы имеют большое значение в современной мировой экономике. Хлопок является одним из наиболее ценных видов сырья для производства различных промышленных, пищевых и бытовых продуктов. В этой работе представлены результаты экспериментальных исследований гидродинамики стационарного слоя при фильтрационной сушке хлопка сырья. Для этого важно установить зависимость потерь давления в стационарном слое влажного волокна хлопка от фиктивной скорости фильтрации теплового агента, как важного фактора определяющего интенсивность и экономическую эффективность фильтрационной сушки. Основные результаты были опубликованы в научном журнале: A.Y.Khusanov, V.M. Atamanyuk<sup>3</sup>, B.M. Kaldybayeva, A.Z. Abilmagzhanov, D.Zh.Janabayev, Zh.Y. Khusanov. Results of experimental research of hydrodynamics of a stationary layer during filtration drying of raw cotton // Bulletin of National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Volume 4, Number 386 (2020), PP. 41 – 48 <https://doi.org/10.32014/2020.2518-1467.102> ISSN 2518-1467 (Online), ISSN 1991-3494 (Print). 2020

Настоящий акт составлен по итогам НИР, выполненной на кафедре «Технологические машины и оборудование» в 2017 – 2020 г.г.

Настоящим актом подтверждается, что результаты НИР по созданию фильтрационной сушки материалов волокнистой структуры и методики расчета, выполненные докторантом Джанабаевым Д.Ж.

под руководством к.т.н., доц. Хусановым А.Е. и PhD, доц. Калдыбаевой Б.М. внедрены в учебный процесс:

в лекционные занятия по дисциплине «Оборудование для сушки твердых материалов» в разделе «Сушка волокнистых материалов»

(указывается наименование дисциплины и ее разделы)

в практические занятия по дисциплине Процессы и аппараты нефтегазоперерабатывающей и нефтехимической промышленности» для выполнения расчетов по заданию «Рассчитать непрерывно действующую сушилку, работающую по нормальному сушильному процессу при заданных исходных данных»

(указывается наименование дисциплины и ее разделы)

Научный руководитель темы  
Хусанов А.Е.

Начальник отдела координации  
научной деятельности ДАН  
Серкебаев М.К.

Директор ДАВ  
Наукунова А.С.

Директор ДАН  
Назарбек У.Б.

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

Ф.7.07-14

Согласовано:  
Проректор по НР и И  
Сулейменов У.С.  
(Ф.И.О., подпись)  
«05» / 2020г.

Подтверждаю  
Проректор по У и УМР  
Абишева Р.Д.  
(Ф.И.О., подпись)  
«05/2020» 2020г.

АКТ №312 от 05/2020

внедрения результатов научных исследований по диссертации Джанабаева Д.Ж. на тему «Разработка и расчет процесса фильтрационной сушки материалов волокнистой структуры» на соискание ученой степени PhD, выполненной в соответствии с госбюджетной НИР Б-16-05-01 «Разработка методики конструирования и расчета высокоэффективных теплообменных аппаратов и устройств общепромышленного назначения».

Движение газового потока сквозь пористую структуру материала представляет собой смешанную задачу гидродинамики. В этой работе предлагается использование фильтрационного способа сушки хлопка сырца и расчет гидравлического сопротивления. Для описания гидродинамики движения газа сквозь пористую структуру материала используют теоретические зависимости внутренней или внешней задачи. Основные результаты были опубликованы в научном журнале: A.Y.Khusanov, V.M. Atamanyuk, B.M. Kaldybayeva, A.Z. Abilmagzhanov, D.Zh.Janabayev, Zh.Y. Khusanov. Calculation of hydraulic resistance during filtration drying of raw cotton// News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan Series Chemistry and Technology ISSN 2224-5286 <https://doi.org/10.32014/2020.2518-1491.54> Volume 3, Number 441 (2020), 134 – 141. 2020

Настоящий акт составлен по итогам НИР, выполненной на кафедре «Технологические машины и оборудование» в 2017 – 2020 г.г.

Настоящим актом подтверждается, что результаты НИР по созданию фильтрационной сушки материалов волокнистой структуры и методики расчета

выполненные докторантом Джанабаевым Д.Ж. под руководством к.т.н., доц. Хусановым А.Е. и PhD, доц. Калдыбаевой Б.М. внедрены в учебный процесс:

в лекционные занятия по дисциплине «Оборудование для сушки твердых материалов» в разделе «Сушка волокнистых материалов»

*(указывается наименование дисциплины и ее разделы)*

в лабораторное занятие по дисциплине Процессы и аппараты нефтегазоперерабатывающей и нефтехимической промышленности» для выполнения лабораторной работы «Испытание листового фильтра давления»

*(указывается наименование дисциплины и ее разделы)*

Научный руководитель темы  
Хусанов А.Е.

Директор ДАВ  
Науменова А.С.

Начальник отдела координации  
научной деятельности ДАН  
Серкебаев М.К.

Директор ДАН  
Назарбек У.Б.