

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНЖЕНЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ»

На правах рукописи

БАРАНОВ АНТОН ЮРЬЕВИЧ

РАЗРАБОТКА И НАУЧНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СПОСОБА СУШКИ
ГРЕЧИХИ В АППАРАТЕ С ЗАКРУЧЕННЫМ ПОТОКОМ
ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

05.18.12 – «Процессы и аппараты пищевых производств»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель –
заслуженный изобретатель РФ,
доктор технических наук, профессор
АНТИПОВ СЕРГЕЙ ТИХОНОВИЧ

Воронеж – 2014

Оглавление

Оглавление.....	2
ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕОРИИ, ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ СУШКИ ГРЕЧИХИ	8
1.1. Общая характеристика гречихи	8
1.1.1. Биологические особенности гречихи.....	8
1.1.2. Основные направления использования гречихи и перспективы ее переработки.....	14
1.2. Современные линии по переработке гречихи	20
1.3. Современные способы и аппараты для сушки зерновых сельскохозяйственных культур	23
1.4. Обоснование способа сушки гречихи	36
1.5. Способы и аппараты для проведения процесса сушки с закрученным потоком теплоносителя.....	38
1.6. Математическое описание движения двухфазных потоков в аппаратах с активным гидродинамическим режимом.....	47
1.7. Тепло- и массообмен при сушке дисперсных материалов в аппаратах со сложным гидродинамическим режимом	56
1.8. Основные выводы, постановка цели и задач исследования	58
ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ГРЕЧИХИ КАК ОБЪЕКТА СУШКИ.....	60
2.1. Исследование физико-механических свойств гречихи	60
2.1.1. Определение плотности	61
2.1.2. Изучение насыпной плотности	63
2.1.3. Определение коэффициента плотности укладки	64
2.1.4. Исследование порозности слоя.....	64
2.1.5. Определение углов естественного откоса.....	65
2.1.6. Гранулометрический состав гречихи.....	67
2.2. Исследование теплофизических характеристик гречихи	69
2.3. Исследование гигротермических свойств гречихи.....	78
2.3.1. Дифференциально-термический анализ.....	79
2.3.2. Изучение изотерм сорбции - десорбции гречихи.	82
ГЛАВА 3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ ГРЕЧИХИ В АППАРАТЕ С ЗАКРУЧЕННЫМ ПОТОКОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ	85
3.1. Постановка задачи.....	85
3.2. Движение воздуха в сушильной камере	86
3.3. Движение частицы в сушильной камере	88

3.4. Моделирование тепломассообмена в процессе сушки частицы	90
3.5. Алгоритм численного моделирования процесса сушки частицы гречихи	92
3.5.1. Алгоритм численного моделирования процесса движения частицы в сушильной камере	92
3.5.2. Алгоритм численного моделирования тепломассообмена при сушке частицы гречихи	94
ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА СУШКИ ГРЕЧИХИ В АППАРАТЕ С ЗАКРУЧЕННЫМ ПОТОКОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ	109
4.1. Описание экспериментальной установки и методика проведения эксперимента	109
4.2. Математическое планирование и обработка результатов эксперимента	113
4.2.1. Обоснование выбора и пределов изменения входных факторов	114
4.2.2. Анализ регрессионных моделей	116
4.3. Исследование влияния основных факторов на кинетику процесса сушки гречихи в аппарате с закрученным потоком теплоносителя	118
4.3.1. Исследование зависимости кинетики сушки от соотношения диаметров конической части сушильной камеры d/D	119
4.3.2. Исследование зависимости кинетики сушки от температуры теплоносителя	120
4.3.3. Исследование зависимости кинетики сушки от расхода осевого потока теплоносителя	121
4.4. Многофакторный статистический анализ процесса сушки гречихи	122
ГЛАВА 5. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНЫХ И ПРОЕКТНО-ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ	138
5.1. Организация машинной технологии переработки гречихи	138
5.2. Разработка перспективных высокоинтенсивных сушильных установок с закрученным потоком теплоносителя	143
5.2.1. Сушилка с регулируемым закрученным потоком теплоносителя	143
5.2.2. Сушилка со взвешенно-закрученным слоем	147
5.3. Повышение эффективности сушки в закрученном потоке теплоносителя	152
5.3.1. Способ автоматического управления процессом сушки с регулируемым закрученным потоком теплоносителя	152
5.3.2. Способ автоматического управления процессом сушки дисперсных материалов с рециркуляцией теплоносителя в	

аппаратах с активной гидродинамикой.....	157
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ	164
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	165
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	181

ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных направлений технического прогресса во всех без исключения отраслях промышленности является совершенствование технологических процессов путем повышения их эффективности.

Гречиха одна из наиболее важных сельскохозяйственных культур, являющаяся незаменимым продуктом питания. Гречневая крупа имеет высокие вкусовые качества, питательна, хорошо усваивается. Гречневую крупу относят к числу лучших диетических продуктов. Кроме того, гречиха является хорошим медоносом, а высокая усваивающая способность ее корневой системы способствует повышению плодородия почвы.

Зерно гречихи отличается высоким содержанием незаменимых аминокислот. Под одной из важнейших незаменимых аминокислот – лизину - зерно гречихи превосходит зерно проса, пшеницы, ржи, риса и приближается к соевым бобам. По содержанию треонина зерно гречихи превосходит зерно проса, пшеницы и ржи, а по содержанию валина уступает лишь рису.

По содержанию валина зерно гречихи может быть приравнено к молоку, по лейцину – к говядине, фенилаанину – к молоку и говядине. По содержанию триптофана зерно гречихи не уступает продуктам животного происхождения.

Белки зерна гречихи хорошо сбалансированы по содержанию незаменимых аминокислот. Исключение составляют изолейцин и особенно серосодержащие аминокислоты, которых недостаточно в белках зерна гречихи.

Сушка зерна гречихи является одной из важнейших стадий подготовки данного сырья к последующему процессу его переработки. От режима сушки зависят пищевая ценность и качественные показатели готовой продукции, являющиеся результатом структурно-механических, биологических и физико-механических преобразований веществ. Технологические режимы сушки зерна гречихи зависят от содержания в них воды и оказывают существенное влияние на изменение углеводов, денатурацию белка, окисления липидов, изменения витаминов и органических кислот.

По данным Росстата в России посевные площади гречихи составляют 1,2 млн Га (из них около 50 тыс Га в Воронежской области). Валовый сбор гречихи в Российской Федерации 8 млн тонн (в Воронежской области – 300 тысяч тонн). Доля малых и фермерских хозяйств среди всех хозяйств выращивающих гречиху с каждым годом увеличивается на 3...5 % и уже составляет порядка 30 %.

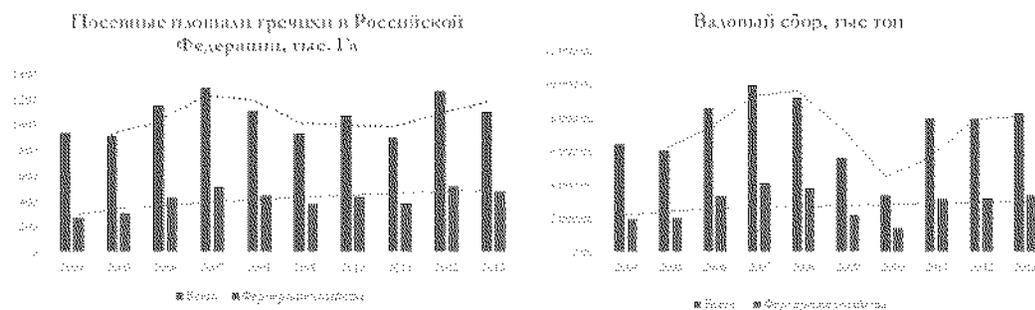


Рис. 1. Валовый сбор и посевные площади гречихи в Российской Федерации

Сушка гречихи осуществляется в настоящее время в сушильных установках для зерновых культур (шахтные, барабанные и пр.) характеризуется низкой эффективностью из-за невозможности обеспечения постоянного полного контакта поверхности гречихи с теплоносителем.

В теорию сушки дисперсных материалов значительный вклад внесли такие отечественные и зарубежные ученые как А.С. Гинзбург, В.И. Муштаев, Б.С. Сажин, П.А. Ребиндер, П.Г. Романков, В.И. Попов, И.Т. Кретов, С.Т. Антипов, К.Г. Филоненко, А.Н. Остриков, В.М. Ульянов, Б.И. Леончик, В.Е. Куцакова, М.А. Гришин, О. Кришер и многие другие

При рассмотрении основных направлений совершенствования процесса сушки дисперсных продуктов, нами был сделан вывод о том, что качественная и эффективная сушка гречихи может быть реализована только при использовании аппаратов с использованием активного гидродинамического режима, существующего в аппаратах с закрученным потоком теплоносителя.

Работа выполнена в соответствии с планом НИР кафедры машин и аппаратов пищевых производств ВГУИТ на 2011-2015 гг. «Адаптация пищевых машинных технологий к тепло- и массообменным процессам на основе диа-

гностики техники и технологии пищевых производств» (№ госрегистрации 01201253880), и в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (Государственный контракт № П2608 «Разработка ресурсосберегающей техники и технологии сушки сельскохозяйственных дисперсных продуктов во взвешенно-закрученном потоке теплоносителя»)

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕОРИИ, ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ СУШКИ ГРЕЧИХИ

1.1. Общая характеристика гречихи

1.1.1. Биологические особенности гречихи

Гречиха одна из наиболее важных сельскохозяйственных культур, являющаяся незаменимым продуктом питания. Гречневая крупа имеет высокие вкусовые качества, питательна и хорошо переварима, ее относят к числу лучших диетических продуктов. Кроме того, гречиха является хорошим медоносом, а высокая усваивающая способность ее корневой системы способствует повышению плодородия почвы.

Род гречиха представлен тремя самостоятельными видами: гречиха посевная, гречиха татарская, гречиха полузонтичная. Все сорта гречихи в России относятся к одному и тому же виду – *Fagopyrum esculentum*. Гречиху выращивают практически на всей территории страны – от западных до восточных границ.

Род *Fagopyrum* Mill прошел длительный путь исторического развития. Представляющие его виды и разновидности отличаются по морфологическим признакам, биологическим свойствам и хозяйственной ценности. Наиболее хорошо известным как важная продовольственная культура и широко возделываемым во многих странах мира и у нас является вид *F. esculentum* Moench. – гречиха посевная или обыкновенная. Это однолетнее растение высотой 50...150 см. Стебель ветвистый, полый, цилиндрический, коленчатый, красновато-зеленой окраски, в междоузлиях пустой. Листья сердцевидно-треугольные или стреловидные, нижние – длинночерешковые, а верхние – почти сидячие. Листья имеют прилистники в виде перепончатых раструбов, которые расположены на длинных пазушных цветоносах, собраны в кисти и щитки. Околоцветник пяти раздельный, белый, бледно-розовый,

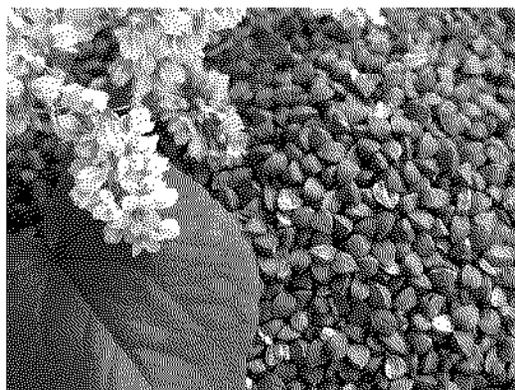


Рис. 1.1. Гречиха посевная

розовый или красный. Тычинок восемь, чередующихся с восемью нектарниками, пестик один трехстолбчатый. Цветки генеростильные.

Вегетационный период гречихи посевной, или съедобной (*F. sagittatum*, или *F. esculentum*) длится от 60 до 120 суток. Цветение очень растянуто и продолжается 25...40 суток. Солома гречихи, которая составляет 42...62 % от массы всего растения, как правило, остается на полях или сжигается. По своим пищевым качествам она мало пригодна для корма животных.

Плоды – трехгранные орешки с гладкими гранями и цельными ребрами, коричневой, черной или серой окраски (рис.1.1).

Иногда встречаются зерна двух- и четырехгранные. Снаружи зерно покрыто голубой плодовой оболочкой (20...25 %), неплотно охватывающей ядро. Плодовая оболочка сростается с ядром лишь в одной точке – середине основания ядра – и легко отделима от него. Ядро (70...80 %) также трехгранной формы, снаружи покрыто тонкими семенными оболочками (1,5...2,2 %), за которыми расположен алейроновый слой (3,0...5,0 %). Внутри эндосперма, с небольшим выхо-

дом к поверхности, находится сильно развитый зародыш (15... 20 %). Часть зародыща расположена на поверхности семени под оболочками, а большая, имеющая S-образную форму, в середине эндосперма.

Вес, размеры и форма зерна гречихи колеблются в довольно широких пределах и являются важными признаками, характеризующими технологические свойства этой культуры. Технологические свойства гречихи – ее способность давать больший или меньший выход крупы – ядрицы – обусловлены сложным взаимодействием различных факторов, из которых наибольшее значение имеет крупность плодов. Объемный вес гречихи – ее натура – колеблется в пределах 550 – 690 г.

В семенах гречихи содержится белка 8... 16 % (в среднем – 11,1 %). По частям зерна гречихи белок распределен так (%): ядро с зародышем 13,5... 15,0; зародыш 40... 49,5; плодовая оболочка 3,0... 5,0. Азот небелковый азотистых веществ составляет в среднем 6 % от общего количества азота зерна гречихи (3,9... 16,8 %). Фракционированный состав белков зерна гречихи представлен в таблице 1.1.

Таблица 1.1

**Количество азота белковых фракций зерна гречихи, %
от общего азота сухих семян**

Показатели	Общий азот	Альбумины	Глобулины	Проламины	Глютелины	Всего извлеченно
Гречиха	2,2-2,3	21,7-23,3	42,6-45,0	1,1-1,2	10,5-12,3	79,0-82,3

Для зерна гречихи характерно почти полное отсутствие проламинированных белков (0,8... 1,2 %), преобладание над всеми фракциями (глобулинов (42,6... 45,0 %) и содержание значительного количества водорастворимых белков (18,2... 23,3 %). Во фракционном составе белков диплоидного и тетраплоидного зерна гречихи существенных различий нет.

Зерно гречихи отличается высоким содержанием незаменимых аминокислот. Под одной из важнейших незаменимых аминокислот – лизину - зерно гречихи превосходит зерно проса, пшеницы, ржи, риса и приближается к со-

евым бобам. По содержанию треонина зерно гречихи превосходит зерно проса, пшеницы и ржи, а по содержанию валина уступает лишь рису.

По содержанию валина зерно гречихи может быть приравнено к молоку, по лейцину – к говядине, фенилаанину – к молоку и говядине. По содержанию триптофана зерно гречихи не уступает продуктам животного происхождения.

Исключение составляют изолейцин и особенно серосодержащие аминокислоты, которых недостаточно в белках зерна гречихи.

Аминокислотный состав белков зерна гречихи представлен в таблице 1.2.

Таблица 1.2

**Аминокислотный состав белков зерна гречихи
(% от общего содержания белка)**

Наименование	Колебания	Среднее содержание	Наименование	Колебания	Среднее содержание
Лизин	3,79-8,0	6,31	Аланин	3,37-6,50	5,26
Гистидин	1,74-3,50	2,58	Цистин	2,0-2,7	2,23
Аргинин	9,15-28,4	12,17	Валин	3,37-6,25	4,77
Аспарагиновая кислота	6,0-11,80	8,67	Метионин	0,63-2,60	1,49
			Изолейцин	3,54-6,70	4,67
Треонин	2,10-3,85	3,21	Лейцин	3,35-7,93	6,26
Серин	2,0-6,67	4,22	Тирозин	1,76-3,48	2,66
Глютаминовая кислота	7,0-20,97	14,42	Фенилаланин	3,4-4,96	4,13
Пролин	2,89-4,54	3,70	Триптофан	1,42-2,70	2,16
Глицин	4,65-8,76	6,74	Сумма незаменимых аминокислот	32,1-41,2	34,8

Белковые вещества гречихи не способны формировать клейковину и в смеси с белками злаков не принимают участия в ее образовании. Мука из гречихи поэтому резко отличается по своим технологическим свойствам от муки пшеницы и используется для производства изделий, не требующих высокой газодерживающей способности.

Подчеркивая высокий биологический уровень белковых веществ (более

90 %), ряд авторов (в частности, I.Kreft, B.Javornik, B.O. Eggum) отмечает отрицательное влияние клетчатки и дубильных веществ – танинов – на их усвояемость (менее 80 %).

Общее количества жира в зерне гречихи составляет 1,8...3,9 %, при этом по частям гречихи жир распределяется следующим образом (%): плодовая оболочка 0,5...1,3; ядро 2,2...3,0; семенная оболочка 1,6...2,4; эндосперм 0,5...0,7; зародыш 10...22.

Существенные различия в относительном содержании свободных, связанных и прочносвязанных липидов объясняются их различной ролью в процессах жизнедеятельности. Свободные липиды – это в основном запасные липиды, связанные - структурные. Поэтому количественная характеристика липидов зерновых культур без учета связанных форм является совершенно недостаточной (табл.1.3).

Свободные липиды представляют только часть общего количества липидов, хотя и значительную (73 %). Второй по значению группой являются связанные липиды (21,5 %). Относительное содержание прочносвязанных липидов (5,5 %) в гречихи значительно меньше, чем двух других групп. Следует отметить, что в гречихи, по сравнению с другими культурами, в наибольшем количестве содержатся связанные липиды.

Таблица 1.3

**Содержание свободных, связанных и прочносвязанных липидов
в зерне гречихи**

Культура	Содержание, %			
	Свободные	Связанные	Прочносвязанные	Сумма липидов
Гречиха	2,7	0,8	0,2	3,7

Химическую характеристику и биологическую функцию фенольных соединений гречневой крупы исследовали в основном зарубежные ученые. В работах R. Zadernowski, Z.Luthagna основе анализа зерна и ядра гречихи разных сортов дана классификация полифенолов. В гречневой крупе доля танинов составляет 0,24...0,60 %, доля фенольных кислот – около 1.07 %.

Снижение усвояемости гречневой крупы может происходить и под влиянием ингибитора трипсина и хемотрипсина.

По общему химическому составу плоды гречихи относятся к группе крахмалистых. Содержание крахмала колеблется от 50 до 70 % (для плодов с оболочками). В состав углеводного комплекса ядра гречихи также входят моно- и дисахара (их сумма колеблется незначительно от 2,1 до 2,6 %), декстрины (0,3... 0,9 %), клетчатка (1,2... 1,8 %). В плодовой оболочке содержание клетчатки составляет 10... 17 %.

Клетчатка в основном входит в состав плодовых оболочек и в значительно меньшем количестве находится в эндосперме.

Содержание пищевых волокон в гречихи значительно степени зависит от генетических факторов и природных условий и составляет от 5 до 14 %.

В отличие от зерновки злаков ткани эндосперма гречихи содержат много золы и являются источником ряда важнейших минеральных элементов (табл. 1.4).

Таблица 1.4

Содержание микроэлементов в гречихи

Минеральный элемент	K	P	Mg	Ca	Fe	Zn	Mn	B	Cu
Содержание в гречихе, мг/кг	5650	4900	2676	197	30,3	29,2	16,4	6,7	7,1

По сравнению со злаками, такими как рис, кукуруза или с пшеничной мукой гречиха отличается большим содержанием цинка, меди и магния.

Гречневая крупа является богатым источником витаминов (мг/100 г): В₁ (0,43 -1,09), В₂ (0,19- 0,21), РР (4,19-6,10), Р (6,00-11,2), Е(8,73-9,11) и др.

На гречиху имеется следующий стандарт: ГОСТ 19092-92. Гречиха. Требования при заготовках и поставках.

В стандарте на гречиху нормируют следующие показатели: кислотность, содержание обрубленных зерен, массовую доля ядра (для переработки в крупу этот показатель должен быть не менее 71 % а для выработки продук-

тов детского питания – не менее 73 %), а также влажность, содержание сорной примеси. В соответствии с ГОСТ 19092-92, кислотность зерна для выработки продуктов детского питания должна быть не более 4,5 град.

Стандарт также содержит базисные и ограничительные нормы для гречихи. Гречиха должна быть в здоровом не греющемся состоянии, иметь свойственные здоровому зерну цвет, запах (без затхлого, солодового, плесневелого, постороннего запахов).

1.1.2. Основные направления использования гречихи и перспективы ее переработки

Актуальными проблемами зерноперерабатывающей промышленности в настоящее время являются: удовлетворение потребности населения в продуктах питания; улучшении их качества; разработка новых видов изделий при более полном использовании потенциала зерна.

Крупяные продукты занимают достойное место в рационе питания человека благодаря разнообразному ассортименту, доступности разным слоям потребителей, высокому качеству и пищевой ценности, безопасности, созданию на их базе продуктов с заданным составом и свойствами. [40]

Среди крупяных культур гречиха занимает особое место. В сравнении с основными зерновыми культурами гречиха не может формировать высокий урожай. Однако, как показывает история, в мировом земледелии она возделывается на протяжении 2 тыс. лет. Феномен гречихи – в ее разностороннем использовании, в высоком качестве получаемых из нее продуктов. На рисунке 1.2 показаны варианты использования гречихи.

Благодаря высокой пищевой и биологической ценности, продукты, вырабатываемые из гречихи, широко используются не только в общественном, но и в детском и диетическом питании. Однако, в настоящее время основными продуктами, вырабатываемыми из гречихи, является крупа: ядрища и продел.

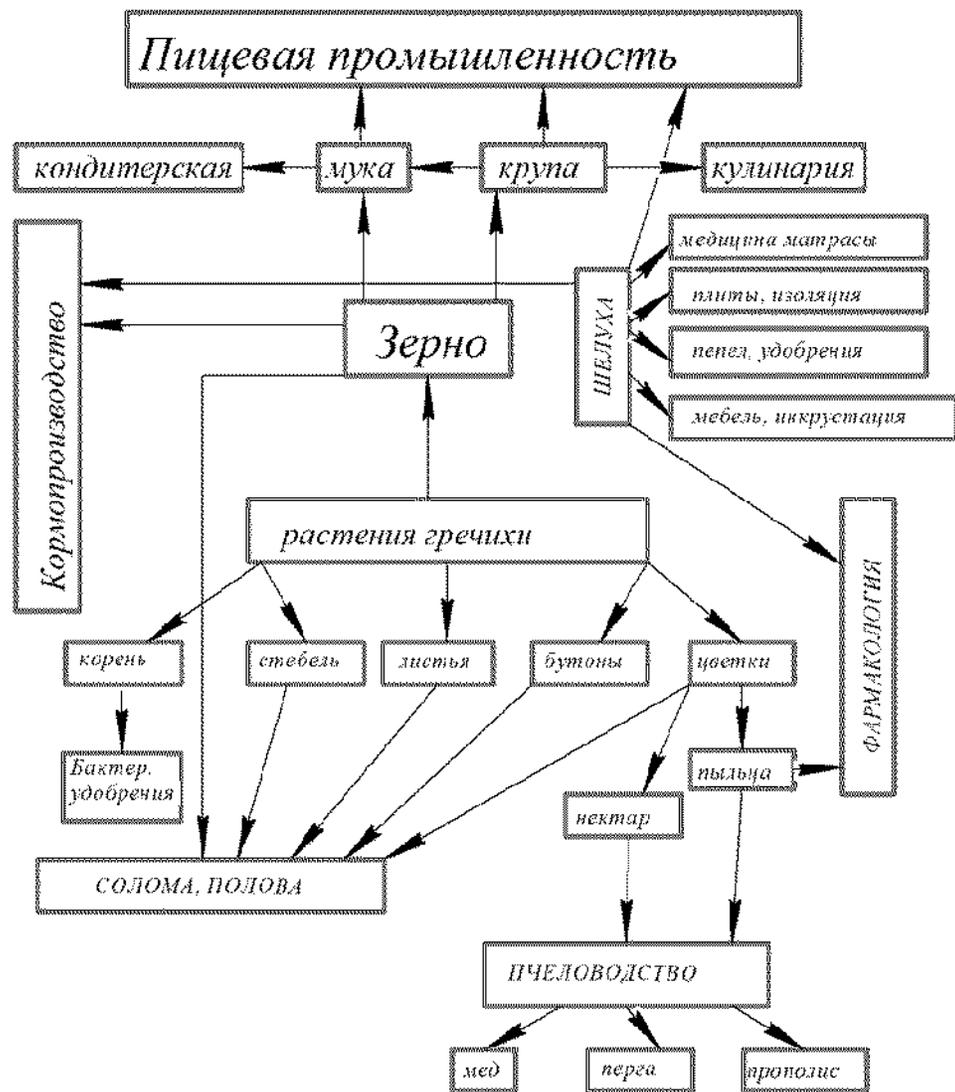


Рис.1.2. Основные направления использования гречихи

Гречневая крупа - незаменимый компонент здорового питания. Она выращивается без «химии». В зернах гречихи содержатся: легко усваиваемые белки - до 16 % (в том числе незаменимые аминокислоты - аргинин и лизин); углеводы - до 30 % и жиры – до 3 %; много минеральных веществ (железо, кальций, фосфор, медь, цинк, бор, йод, никель, кобальт); клетчатка; яблочная, лимонная, щавелевая кислоты; витамины группы B, PP и P (рутин).

Содержащееся в крупе железо способствует образованию красных кровяных телец и гарантирует хороший цвет лица. Калий поддерживает оптимальное кровяное давление, кальций – наш верный союзник в борьбе против кариеса, ломких ногтей и хрупких костей, магний спасает от депрессии и по-

могает в борьбе с лишним весом.

Особенно полезна гречка, как считают врачи, больным диабетом и людям, страдающим ожирением, поскольку гречка содержит меньше углеводов, чем другие крупы, ведь недаром диабетикам и тучным людям противопоказаны продукты с высоким их содержанием: рис, картофель, белый хлеб, сладости. Блюда из гречки заменят больному и картофель, и хлеб.

Гречневая каша помогает работе сердца и печени, она способствует выведению из организма избыточного холестерина (а значит, любителям гречки не столь грозят старческий склероз и проблемы с сердцем), выводит из организма шлаки и ионы тяжелых металлов, что особенно актуально для жителей мегаполисов и районов с неблагоприятной экологией.

Гречка рекомендуется людям, страдающим болезнями сосудов, ревматизмом и артритом, она уменьшает проницаемость сосудов и их ломкость, препятствует тромбообразованию. Среди других круп гречка считается наиболее полноценной заменой мясу.

Врачи ценят гречку и за большое количество рутина. Это вещество уплотняет стенки кровеносных сосудов, останавливает кровотечения, оказывает профилактическое и лечебное воздействие на вены, например, при варикозном расширении вен и при геморрое. В соединительных тканях рутин укрепляет мельчайшие кровеносные сосуды. Поэтому гречневая каша крайне полезна при различных заболеваниях сосудов. Она улучшает кровообращение и укрепляет иммунную систему. Гречка ценится также за способность поддерживать зрение и мозговое кровообращение.

Относительно недавно на рынке появились гречневые хлопья, которые являются ценным пищевым продуктом питания, имеющим высокие потребительские качества, высокую степень усвояемости, перевариваемости организмом человека. Качество многих таких продуктов сегодня оставляет желать лучшего, так как современные технологии основаны на производстве хлопьев именно из крупы.

Также в нашей стране выпускают муку гречневую I сорта (ТУ 9293-00500932169-96). Гречневая мука предназначена для использования в новых рецептах хлебобулочных, кондитерских и кулинарных изделий (хлеб, хлебцы, блины, кексы). Гречневая мука зачастую вырабатывается из продела или мелких фракций ядрицы, получаемых по традиционной схеме производства гречневой крупы, что приводит к значительному удорожанию стоимости гречневой муки.

Помимо основных продовольственных продуктов из гречихи не следует забывать и о лузге - ценном вторичном сырье для производства различных пищевых добавок. Химический состав гречневой лузги предопределяет необходимость развития технологий и разработки современного оборудования для глубокой безотходной переработки лузги.

Стандартная технология получения крупы из зерна гречихи включает подготовку зерна к переработке и непосредственно переработку его в крупу путем шелушения. Подготовка зерна к переработке в крупу включает отделение примесей и гидротермическую обработку (ГТО) - пропаривание, сушку и охлаждение пропаренного зерна.

Поступающее зерно обычно имеет невысокую влажность, структурно-механические свойства эндосперма и оболочек различаются незначительно. Поэтому разделить их при шелушении трудно и результаты переработки такого зерна получаются невысокими. При проведении ГТО стремятся прежде всего усилить различие свойств оболочек и эндосперма (ядра) путем повышения прочности ядра и уменьшения прочности оболочек (пленок). Обработка паром (пропаривание) приводит к быстрому увлажнению и прогреву зерна. При этом в результате физико-химических изменений преобразуется структура эндосперма, происходит его пластификация, снижение хрупкости, повышение сопротивляемости разрушению. Вследствие неравномерного набухания составных частей зерна ослабевает связь пленок и ядра.

Последующая после пропаривания сушка обезвоживает в большей степени наружные пленки, которые, теряя влагу, становятся более хрупкими и

легче раскалываются при шелушении. Кроме того, возникающие в процессе пропаривания и сушки деформационные изменения в составных частях зерна приводят к отслаиванию оболочек.

Охлаждение после сушки дополнительно снижает влажность зерна, при этом холодные оболочки становятся более хрупкими. Т.о., ГТО улучшает технологические свойства зерна, позволяет снизить дробимость ядра при шелушении и шлифовании, а происходящие при этом биохимические изменения позволяют получать продукцию с улучшенными органолептическими качествами, повышающими потребительские достоинства крупы при сохранении ее биологической ценности.

При изучении современного состояния теории, техники и технологии переработки гречихи обнаружился ряд проблемных моментов. Один из таких моментов - необходимость обеспечить качественный и эффективный процесс сушки семян, задача которого заключается в снижении ферментативной активности, приводящей к разрушению биологически активных веществ в сырье. Высушенные семена могут храниться длительное время, не подвергаясь порче.

Сушка зерна при температуре агента сушки 175... 180 °С до влажности 12...12,5 % в сочетании с предшествующими операциями увлажнения и отволаживаяния зерна ведет к улучшению потребительских свойств гречневой крупы: исчезает горьковатый привкус, характерный для крупы без гидротермической обработки, крупа приобретает легкий аромат и вкус поджаренного ореха. Кроме этого, увеличивается срок хранения крупы из-за инактивации липолитических ферментов и частичной стерилизации зерна гречихи.

Если температура агента сушки будет ниже 175 °С, то химические процессы в ядре, влияющие на вкус, аромат, длительность хранения, пройдут в недостаточной степени, поэтому потребительские свойства крупы не улучшатся.

Если температура агента сушки будет выше 180 °С, то химические процессы в ядре, наоборот, слишком интенсифицируются, что вызовет из-

лишнее упрочнение ядра и соответственно увеличит затраты энергии на его размалывание, кроме того, крупа приобретет более темную окраску.

При влажности зерна после сушки менее 12 % ядро становится излишне хрупким, поэтому при шелушении зерна увеличится выход муки и снизится общий выход ядра (целого и дробленого), что, в конечном итоге, уменьшит выход крупы.

При влажности зерна после сушки более 12,5 % снижается коэффициент шелушения зерна из-за того, что плодовые оболочки остаются достаточно пластичными, возврат нешелушенного зерна при этом на повторное шелушение увеличит затраты энергии как на этот процесс, так и на выработку муки в целом.

Но в России не выпускается специального оборудования, предназначенное для сушки гречихи, а используемая для сушки зерна отечественная техника, представленная в основном шахтными и барабанными сушилками, не совсем пригодна для гречихи.

Это объясняется следующим: начальная влажность гречихи в зависимости от условий выращивания и уборки может быть от 14 до 25 %. Кондиционная конечная влажность при переработке гречихи составляет 14 %. Спецификой переработки гречихи является то что ее перед шелушением необходимо пропарить, после пропаривания влажность гречихи составляет 22 %. И именно с этой влажности ее сушат до 14 % после чего отправляют на шелушение. Кроме того, хранение гречихи при влажности более 14 % ведет к ее преждевременной порче и прогорканию.

Рассмотрим подробнее современные способы и аппараты для сушки зерновых культур.

1.2. Современные линии по переработке гречихи

Традиционно линия по переработке гречихи состоит из двух отделений: подготовительного и шелушильного. В подготовительном отделении зерно принимают, на зерноочистительном станке очищают от сорных примесей, таких как семечки, овес и т.д., на камнеотделительном станке отделяют от различных минеральных примесей. В барабанной электрической сушилке производится предварительная просушка. Кроме этого, в подготовительном отделении смонтирована система приточной вентиляции с возможностью подогрева воздуха. Схема, по которой смонтировано оборудование, позволяет направлять зерно в шелушильное отделение, минуя предварительную сушку, если влажность соответствует требованиям технологического процесса (не более 14,5%). В шелушильном отделении смонтирован запарник зерна, вторая сушилка, калибровочный станок и два шелушильно-сортировочных станка. Там же установлен парогенератор.

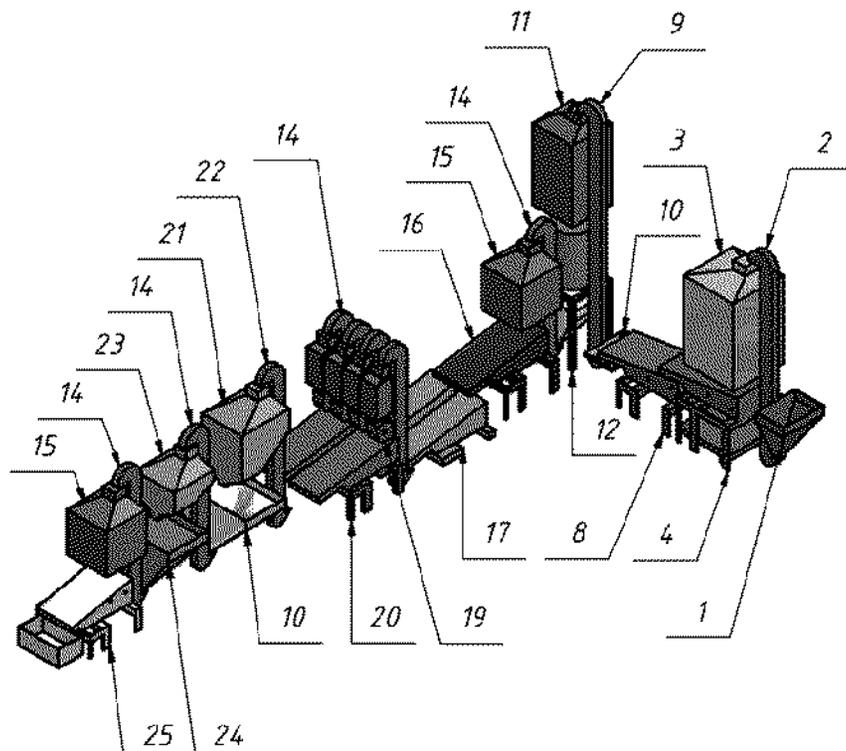


Рис. 1.3. Линия по переработке гречихи

Но главное достоинство этой линии в полном технологическом цикле,

полной механизации и отличном качестве получаемой продукции. Все станки этого отделения соединены общей системой аспирации, элеваторами зерна и вытяжной вентиляцией шелухи.

Размер отверстий сортировочного сита подбирается в зависимости от крупности зерна в партии, подлежащей очистке, чтобы проходом получить все зерно, а сходом - крупную примесь. Размер отверстий подсевного сита системы сепарирования устанавливается из расчета отсева проходом мелкого сора и песка и получения сходом очищенного от них зерна.

Чтобы лучше выделить мелкое зерно, а вместе с ним мелкие примеси, подсевное сито располагают с большим размером отверстий, чем предусмотрено государственным стандартом на мелкое и щуплое зерно.

Режим работы аспирационной части станка должен быть достаточно интенсивным, чтобы выделить максимально возможное количество легкой примеси, не захватывая при этом годного зерна. Скорость воздуха в аспирационном канале должна быть меньше скорости уноса зерна гречихи, но достаточной для выделения легкой примеси. Поток очищенного зерна направляется в камнеотделительный станок, где очищается от минеральной примеси.

Затем проводится режим гидротермической обработки зерна до шелушения, что улучшает его технологические свойства и пищевые достоинства вырабатываемой крупы. Перед началом работы, корпус пропаривателя прогревается паром. После через загрузочный люк засыпается 150-160 кг очищенного от примесей зерна гречихи.

Для лучшего прогрева всей массы гречихи необходимо приоткрыть разгрузочный клапан так, чтобы пар через него выходил в небольшом количестве, но гречиха при этом не высыпалась. После прогрева в течение 5...10 минут зерно выдерживают под давлением пара 2,0 кгс/см² 5...10 минут. Зерно после пропаривания должно иметь темно-коричневый цвет и влажность не более 18 %. В случае, если влажность зерна превышает 18 %, необходимо довести параметры пара, подаваемого в пропариватель, до

указанных выше. Кроме этого необходимо произвести теплоизоляцию корпуса пропаривателя и подводящего паропровода для уменьшения конденсации пара.

пропаренного зерна производится в паровой сушилке. Сушка идет непрерывно. Влажность зерна после сушки не должна превышать 15 %. По окончании сушки зерно подается на калибрование. Для того, чтобы при шелушении уменьшить дробление ядра, повысить эффект работы шелушительных станков, гречиху сортируют по крупности на четыре фракции. Отсортированные зерна гречихи самотеком направляются в накопительные емкости.

После шелушения в шелушительном узле продукт поступает на приемное сито, где проходом отделяется мучка, а сход - смесь обрушенных и не обрушенных зерен, а также лужга - провеивается в первом аспирационном канале. После провеивания зерновая смесь освобождается от плодовых оболочек.

Наиболее ответственный процесс - отбор шелушенных зерен (ядрицы) от нешелушенных. При наличии гречихи в ядрице свыше 0,3 % она будет нестандартной. Наличие ядрицы в гречихе, направляемой на повторное шелушение, должно быть не более 3,0 %.

После шелушения определенной фракции продукты шелушения после провеивания поступают на сортировочное сито, в котором устанавливается сито с отверстиями на 0,2... 0,3 мм меньше отверстий сита на калибровочном станке, сходом с которого была получена гречиха данной фракции. При этом зерна, оставшиеся нешелушенными, не могут пройти через отверстия сита и идут сходом, а ядрица проходит, так как диаметр окружности, описанной вокруг самого крупного ядра данной фракции меньше диаметра отверстий сита, с которого получена гречиха. Нешелушенные зерна гречихи направляются на повторное шелушение.

Ядрица, выделенная проходом через сортировочное сито, поступает на подсевное сито, состоящее из двух полотен. В начале установлено сито с отверстиями 01,5 мм, проходом через это сито получаем мучку. Далее установлено сито с отверстиями размером 2,0 x 20. Проходом через это сито получа-

ем продел. Ядрица сходом с подсевного сита направляется во второй канал, где окончательно провеивается от легких примесей.

Источником пара для гидротермии и паровых сушилок, служат два двухконтурных паровых котла работающих на шелухе. Кроме непосредственного производства крупы, предусмотрена переработка отходов (шелухи) в брикеты и пеллеты. Для этого, используется прямоточная сушилка шилухи печными газами и брикетный экструдер. Брикеты получаемые из шелухи, отличаются большим количеством тепла образующимся при их долговременном горении и малым количеством выделяемой сажи. Брикеты идеальны для жарки шашлыков, барбекю и прочих лакомств, могут применяться при печном отоплении и для каминов.[147]

1.3. Современные способы и аппараты для сушки зерновых сельскохозяйственных культур

Способы и технологии сушки, конструкции установок в значительной степени определяются рядом параметров, таких как исходная и конечная влажность продукта сушки, его физико-химические свойства, допустимые при сушке температуры, не разрушающие полезные вещества и витамины.

Определяющим в выборе технологии сушки являются также и объемы переработки продукта.

Сушка зерна при подготовке их к технологической переработке производится главным образом на шахтных и барабанных сушильных установках различных модификаций.

В последние годы находят применение сушилки с кипящим слоем, а также (в основном на зерноприемных предприятиях) рециркуляционные сушилки.

Общими классификационными признаками сушилок для зерновых культур являются следующие:

- в сушилках применяется конвективный способ подвода тепла к семе-

нам;

- сушилки стационарные, непрерывного действия;
- сушильным агентом служит смесь атмосферного воздуха (~90 %) с продуктами сгорания газообразного, жидкого и твердого топлива (~10 %);
- по направлению движения семян и сушильного агента сушилки работают по принципу, близкому к перекрестному току.

Способы сушки и конструкции сушилок, применяемые за рубежом для сушки зерновых культур, мало отличаются от принятых в нашей стране. В последние годы получили также распространение шахтные зерносушилки с предварительным подогревом зерна и с кипящим слоем. В основном же используется конвективный способ сушки в плотном малоподвижном слое и основанные на нем шахтные, жалюзийные и ленточные сушилки.

В настоящее время для сушки семян зерновых культур могут найти применение следующие сушильные установки.

Колонковые ромбовидные сушилки для зерна СЗ-6, СЗ-10, СЗ-16 (рис. 1.2) практичны и удобны в эксплуатации: для их установки не обязательны капитальные фундаменты, достаточно бетонных плит, полов и фундаментных блоков. Специальные помещения для хранения сушилок не требуются, достаточно навесов. Также сушилки могут быть встроены в существующие зерносушильные комплексы по различным схемам [162].

Сушилки для зерна имеют оригинальное модульное конструктивное исполнение, простота и компактность которого позволяют быстро смонтировать и запустить сушилки в любой период, включая холодное время года.

Основные преимущества данного типа сушилок:

- экономичность: по сравнению с аналогичными агрегатами потребляют на 25...40 % электроэнергии и топлива меньше. Такие колонковые сушилки имеют встроенные камеры охлаждения, и использование тепла, полученного при охлаждении в них высушенного зерна, позволяет снизить удельный расход топлива. В шахтных, карусельных, барабанных и других типах сушилок для охлаждения зерна требуются дополнительные устройства, а полученный

при охлаждении воздух не используется. Удельный расход топлива в сушилках этих типов колеблется на уровне 12... 18 кг/пл.т.;

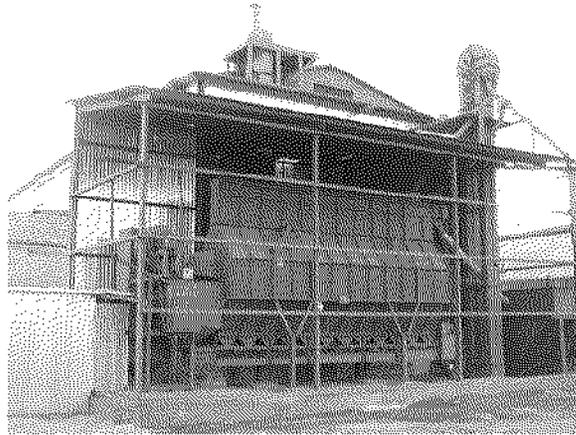


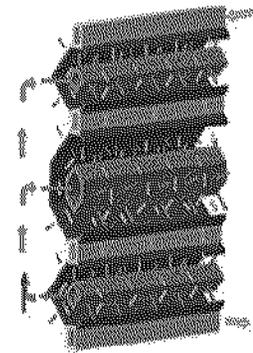
Рис. 1.3. Колонковая ромбовидная сушилка для зерна СЗ-6

- возможность монтажа и запуска в зимний период: благодаря этой особенности колонковые сушилки для зерна обеспечивают просушку и сохранность находящегося на хранении зерна повышенной влажности. Использование сушилок для прогрева семян перед посевом значительно улучшает показатели: энергию прорастания - на 4...22 %, всхожесть семян - на 3...11 %. Повышение урожайности за счет прогрева семян достигает 1,5... 3 ц/га;

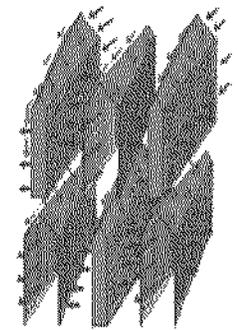
- более высокая равномерность сушки зерна, обеспечиваемая за счет наличия инверторов, расположенных между камерами нагрева, сушки и охлаждения, и перемещающих зерно слоями. Также равномерность сушки повышается за счет выполнения этих камер отдельными элементами;

- отсутствие внутренних перегородок - благодаря этой конструктивной особенности сушилок СЗ-6, СЗ-10 и СЗ-16 продвижению зерна внутри агрегата ничего не препятствует, следовательно, не образуется и застойных зон, в которых, как правило, происходит возгорание зерна;

- простота в обслуживании и высокая надежность: та-



а



б

Рис. 1.4. Схема работы сушилок: а) серии СЗ; б) се-

кие сушилки для зерна в отличие от карусельных сушилок не имеют забивающегося сетчатого дна и множества проблемных в эксплуатации вращающихся элементов;

- возможность транспортировки автомобилями типа «КАМАЗ» благодаря модульному исполнению сушилок.

Примером удачного сочетания преимуществ колонковой и шахтной конструкции (рис. 1.4) являются колонковые сушилки СЗК-30, СЗК-40, СЗК-50: использование реверсивной подачи агента сушки в процессе движения зерна вниз по колонкам дало возможность существенно снизить металлоемкость и уменьшить габариты по сравнению с шахтными сушилками[159].

Технические характеристики сушилок представлены в таблице 1.5.

Таблица 1.5

Технические характеристики колонковых сушилок

	СЗ-6	СЗ-10	СЗ-16	СЗК-30	СЗК-40	СЗК-50
Производительность за 1ч основного времени при снижении влажности с 20 до 14%, т	6,0	10,0	16,0	30,0	40,0	50,0
Пределы регулирования производительности, т/ч	6...10	5...18	5...25	10...50	10...65	10...75
Удельный расход топлива на сушку зерна, кг/пл.т	не более 6	не более 6	не более 6	не более 6	не более 6	не более 6
Установленная мощность, кВт	40,5	59,0	77,5	91,0	115,0	153,0
Вместимость сушилки, м ³	9,0	14,0	18,0	40,0	60,0	70,0
Габариты, м	9,1x1,8x4,7	9,6x3,3x6,5	10,5x3,7x8,5	8,0x7,2x14,5	8,5x7,2x14,5	8,5x7,2x16,5
Масса, т	3,5	6,5	8,5	13,0	20,7	26,0

Но конструкции таких сушилок имеют ряд недостатков. Они неэкономичны, невозможны сушка зерна повышенной влажности и засоренности, получение зерна для семян.

Зерносушилка (Патент № 2170399) лишена таких недостатков. Она состоит из следующих основных частей (рис. 1.3): двух шахт 1, 2, собранных из трех бункеров 3, 4, 5, внутри которых размещены жалюзийные секции 6, 7,

трех распределительных камер 10, 11, 12 агента сушки, двух воздухопроводов 13, 14, разгрузочного устройства.

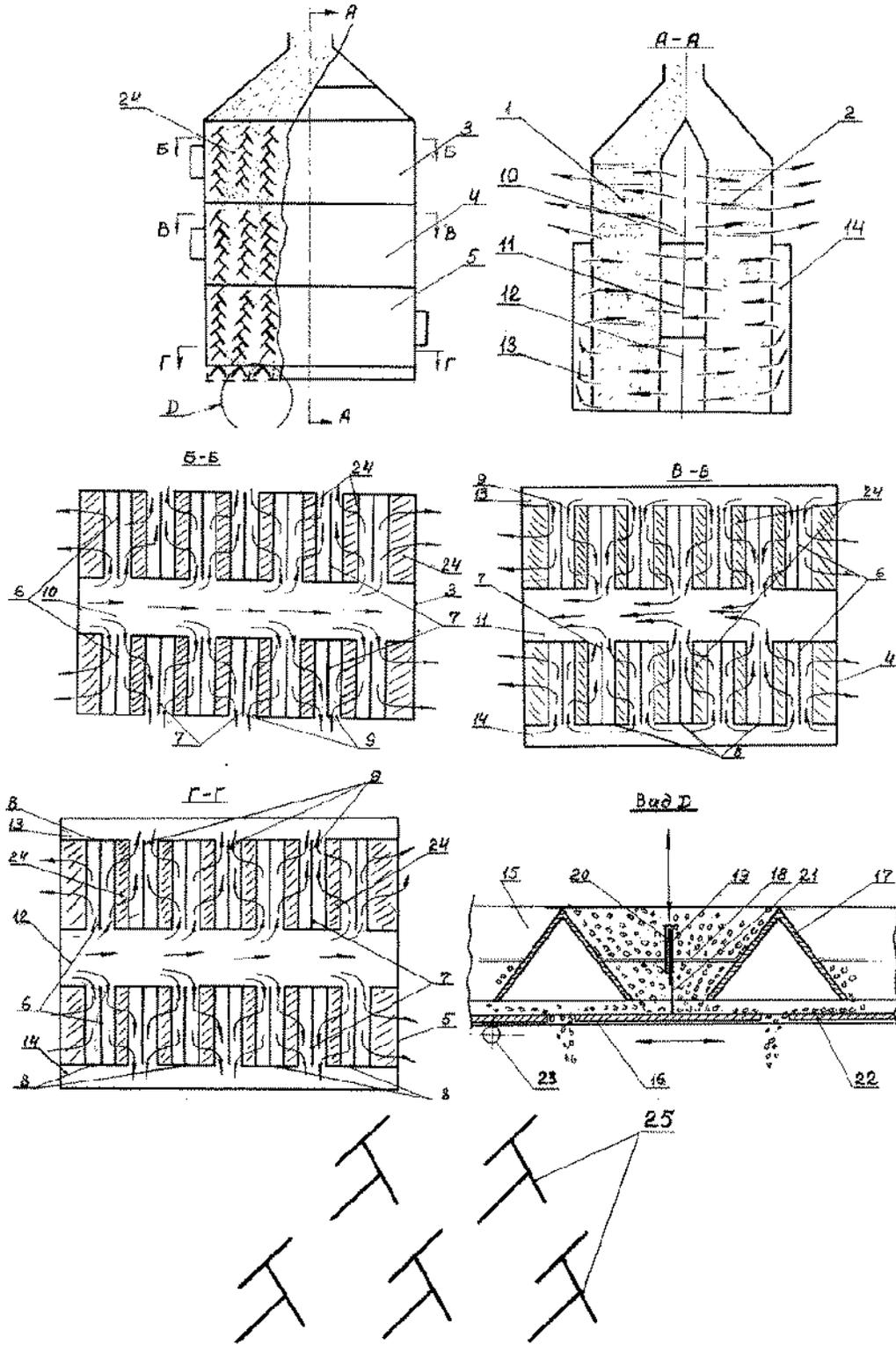


Рис. 1.5 Патент № 2170399

Работа сушилки зерна происходит следующим образом.

После заполнения сушилки зерном в распределительную камеру 12 бункера 5 подается агент сушки, который через окна 9 жалюзийных секций 6 проходит сквозь зерновой слой 24, затем выходит в жалюзийные секции 7 и через их окна 9 перемещается на противоположные стороны в воздуховоды 13, 14. Из них агент сушки через окна 9 жалюзийных секций 6 бункера 4 обеих шахт проходит сквозь зерновой слой 24, затем выходит в жалюзийные секции 7 и через их окна 9 перемещается на противоположные стороны шахт 1, 2 в распределительную камеру 11 бункера 4, где секции развернуты на 180° относительно секций в бункерах 3, 5, что обеспечивает реверсивную подачу агента сушки.

Из распределительной камеры 11 вентилятор отсасывает агент сушки и под давлением через распределительную камеру 10 подает его в окна 9 жалюзийных секций 6 бункера 3.

Пройдя через зерновой слой 24 бункера 3, агент сушки попадает в жалюзийные секции 7 и через их окна 9 выбрасывается в атмосферу. Такая компоновка многоступенчатых жалюзийных секций и воздуховоды 13, 14 с вентилятором позволяют осуществить сушку зерна в бункерах 4, 5 под разрежением, а в бункере 3 - под давлением, при этом агент сушки используется трижды и насыщенный влагой, с температурой 28-30° выбрасывается в атмосферу.

Просушенное зерно из шахт 1, 2 попадает в разгрузочное устройство, расположенное в их нижней части. Оно состоит из верхней неподвижной рамы 15 и расположенной под ней подвижной рамы 16. На раме 15 имеются отверстия для выпуска зерна, установлены рассекатели 17, седла 18, на них цилиндры 19 со штоками 20, к штокам крепятся разгрузочные планки 21. Подвижная рама 16 собрана из горизонтальных полок 22, установлена на роликах 23 и приводится в возвратно-поступательное движение шатуном эксцентрикового механизма (на фиг. 6 не показан).

Когда рама 16 приводится в движение, зерновые слои в шахтах сушилки также начинают двигаться вниз. Зерно из шахт поступает на рассекатели 17, его поток разделяется и стекает к отверстиям на раме 15, из них - на движущиеся возвратно-поступательно полки 22 рамы 16, откуда его сгребают вертикально-подвижные разгрузочные планки 21, плотно, с зазором не более 5 мм, прилегающие к полкам 22. Зерно сыплется в разгрузочные щели между полками 22. Ширина полок 22 больше ширины выпускных отверстий на раме 15, что обеспечивает фиксацию зерна при остановке зернового потока.

Производительность разгрузки зерна регулируется расстоянием между рамами 15 и 16 и величиной хода рамы 16.

Такая сушилка обеспечивает эффективную и равномерную сушку зерна различных культур повышенной влажности и без очистки как в семенном, так и в продовольственном режиме, за один пропуск, дает экономию топлива в 3 раза по сравнению с существующими нормами его расхода с равномерным процессом как периодической, так и непрерывной разгрузки зерна.

Шахтная сушилка непрерывного действия производства Агромолтехника (рис. 1.6) предназначена для сушки всех сыпучих продуктов сельского хозяйства. Например: пшеница, рапс, кукуруза, горох, подсолнечник, рис, бобы, ячмень [160].

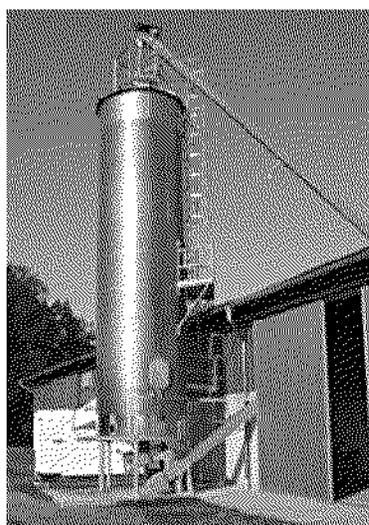


Рис. 1.6. Сушилка Агромолтехника

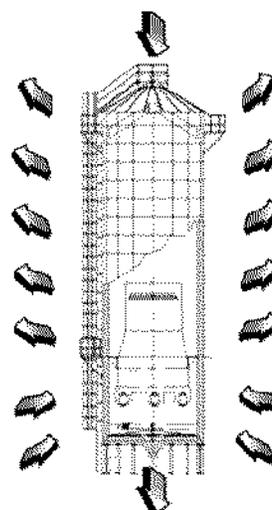


Рис. 1.7. Принцип действия сушилки Агромолтехника

В сушилках данного вида происходит непрерывный процесс сушки благодаря подаче обрабатываемого сырья сверху и выгрузке снизу. Данная конструкция обеспечивает высокую производительность: от 100 до 2000 тонн в сутки.

Сушилки подразделяются на три серии различной производительности: серии RT, RM, RG

Преимущества данных сушилок:

- сушилки компактны, гарантируют сохранение энергии, надежные, с очень низким уровнем шума и дымности, имеющие систему пожарной безопасности;

- полный возврат тепла при охлаждении высушенного зерна значительно уменьшает потребление топлива;

- температура зерна снижается последовательно, зерно не подвергается резким перепадам температуры и достигает зоны разгрузки с температурой близкой к окружающей. Таким образом, зерно сразу готово для закладки на хранение;

- стена зерна представляет собой отличный противозумовой фильтр, уменьшая акустические шумы до очень малых значений. Горелка и вентиляторы разработаны так, чтобы скорость воздуха, выходящего из машины оставалась нулевой. Таким образом, потери сведены до минимума;

- система нагрева снабжена собственным вентилятором, или горелкой с дизельным или газовым топливом;

- центробежный вентилятор с обратными лопастями был разработан для подачи большого потока воздуха с минимальными затратами энергии;

- благодаря конусному компенсатору, образованному особой формой вентиляционного канала, обеспечивается постоянный и однородный поток воздуха для горелки;

- из движущихся элементов в этих сушилках присутствуют только экс-трактор и вентилятор, таким образом сильно уменьшена возможность любых механических поломок в сушилке [160].

Технические характеристики сушилок данного типа представлены в таблице 1.6

Таблица 1.6.

Техническая характеристика сушилок Агромолтехника

Модель	Диаметр, м	Мощность, кВт	Общая высота, м	Сушка с 20% до 15%		Сушка с 25% до 15%		Сушка с 28% до 15%		Полезный объем сушилки, м ³	Вместимость сушилки, т
				т/сут.	т/сут.	т/сут.	т/сут.	т/сут.	т/сут.		
RT1250/6	2,5	11	8	166	100	74	56	15	11		
RT1500/7	2,5	15	9	200	120	88	66	17	13		
RT1750/8	2,5	18	10	232	140	100	78	19	14		
RT2000/9	2,5	18	11	260	156	116	84	21	16		
RT2250/10	2,5	22	12	288	173	128	96	23	17		
RT2500/11	2,5	22	13	316	188	140	104	25	19		
RT2750/12	2,5	22	14	344	206	152	112	27	17		
RM1500/9	3,5	22	11	288	172	128	95	33	24		
RM2000/11	3,5	30	13	384	224	172	128	39	29		
RM2500/13	3,5	37	15	480	288	216	160	45	34		
RM3000/16	3,5	45	18	560	344	256	184	54	40		
RM3500/19	3,5	45	21	680	416	312	228	63	47		
RM4000/21	3,5	50	22	760	468	344	256	67	50		
RM4500/22	3,5	55	24	840	520	384	288	72	54		
RG5000/ 16	5,3	3×30	19	960	584	432	320	94	70		
RG6000/18	5,3	3×30	21	1200	720	536	400	102	77		
RG7000/ 20	5,3	3×37	22	1320	800	600	440	112	84		
RG8000/22	5,3	3×37	24	1440	880	656	488	120	90		

Сушилка барабанная СБУ-1,5 непрерывного действия (рис. 1.7) предназначена для сушки зерна, семян зерновых культур, а также прочих органических и неорганических сыпучих материалов.

Сушилка представляет собой вращающийся барабан, к которому примыкают бункер-дозатор и теплогенератор. Теплоносителем является горячий воздух. Нагрев теплоносителя производится в твердотопливном теплогенераторе. Возможность регулирования скорости вращения барабана позволяет контролировать время нахождения в нем высушиваемого продукта. Внутри барабана по всей его длине расположены лопасти, которые при вращении барабана способствуют пересыпанию высушиваемого продукта, его перемешиванию с одновременным постепенным перемещением к разгрузочному от-

верстию. Дополнительное перемешивание продукта и распределение горячего воздуха обеспечивает внутренний вал барабана. Высушенный материал автоматически удаляется через разгрузочное отверстие.

Сушилки карусельные универсальные СКУ-5, СКУ-15, СКУ-10, СКУ-2,5 (рис. 1.8) предназначены для сушки зерновых, подсолнечника, рапса, риса, бобовых культур и семян трав. Сушилки работают поточно, непрерывно.

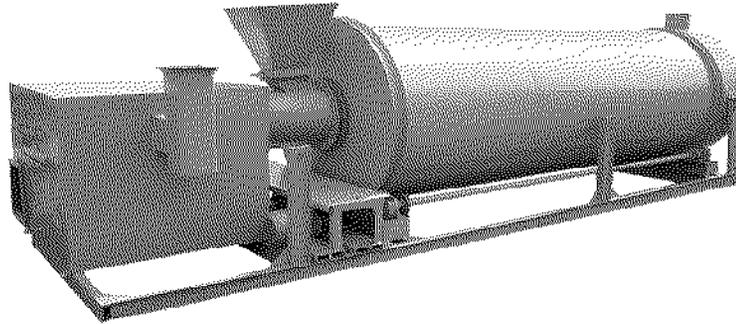


Рис. 1.7. Сушилка барабанная СБУ-1,5

Таблица 1.7

Технические характеристики сушилок барабанных типа СБУ.

Модель	СБУ-1,5-4	СБУ-1,5-5	СБУ-2,0-7
Тип	прямоточная с одним теплогенератором	прямоточная с одним теплогенератором	противоточная с двумя теплогенераторами
Производительность, т/час	0,3	0,5	1,0
Мощность, кВт	3	3	3
Диаметр барабана, м	1,5	1,5	2
Длина барабана, м	4	5	7
Габаритные размеры, мм	2000х6000х2000	2000х7000х2000	4000х10000х2000

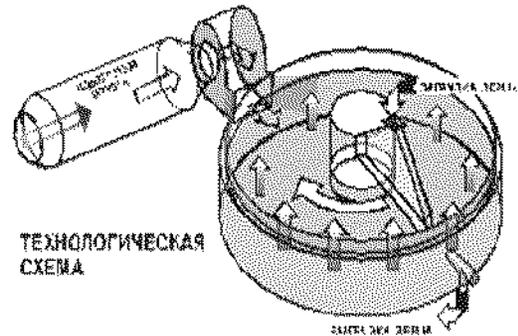
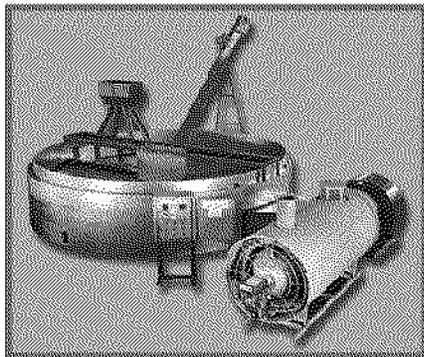


Рис. 1.8. Сушилка карусельная универсальная

Продукт в нижней части слоя, по мере сушки, отделяются и выводятся из сушилок, а сверху автоматически дополняются влажными семенами. Производительность таких сушильных установок на продовольственном режиме составляет 2,5...15 т/ч.

Расход жидкого топлива на 1 т высушиваемого продукта до 6 кг, газа – до 8 м³. Установленная мощность электродвигателей от 20 до 63 кВт.

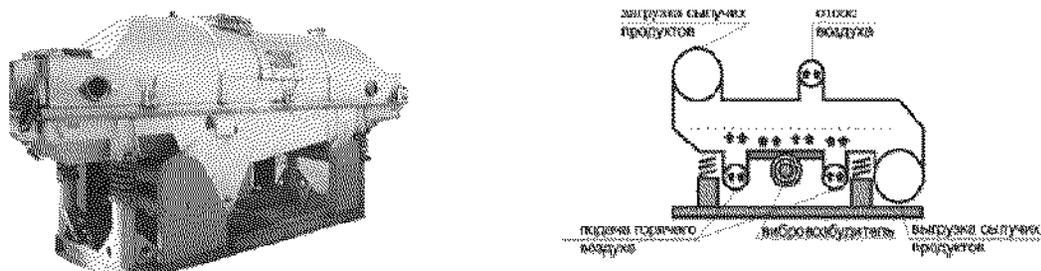


Рис. 1.9. Сушилка вибрационная конвективная СВИК-1

Сушилка вибрационная конвективная СВИК-1 (рис. 1.9) предназначена для сушки (охлаждения) сыпучих, зернистых и порошкообразных материалов, не склонных к прилипанию, с размером частиц от 0,05 до 5,00 мм

Сушилка рекомендуется к применению в химической, микробиологической промышленности, для процессов производства пищевых продуктов и переработки сельхозпродукции.

Вибрационная конвективная сушилка является теплообменным аппаратом непрерывного действия и представляет собой колеблющуюся резонансную систему.

Конструкция сушилки выполнена в виде рамы, на которой через упругие подвески установлен корпус, имеющий в своем составе крышку и желоб с перфорированным лотком. На корпусе смонтированы вибровозбудители, обеспечивающие регулируемую (по амплитуде) вибрацию корпуса, а также технологические патрубки, люки, смотровые окна.

Внутри корпуса на перфорированный лоток через патрубок загрузки подается влажный продукт, подлежащий сушке. Поступающий в подлоточное пространство для проведения процесса сушки горячий теплоноситель, кото-

рый затем проходит через слой влажного продукта и механические вибрационные колебания образуют псевдооживленный слой продукта, перемещающийся под действием сил вибрации в сторону выгрузки. Скорость перемещения и, как следствие, время сушки регулируется амплитудой вибрации корпуса. Прошедший через слой продукта отработанный теплоноситель удаляется через патрубок отвода в систему аспирации.

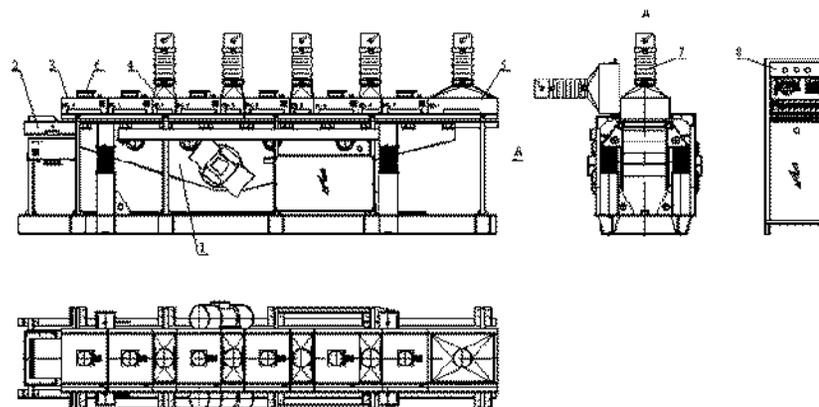


Рис. 1.10. Сушилка вибрационная с инфракрасными излучателями СВИК

Таблица 1.8

Техническая характеристика сушильных установок типа СВИК

Наименование		Значение		
		СВИК-50	СВИК-100	СВИК-350
Производительность кг/ч	по исходному продукту	50	100	350
	по испаренной влаге	6...8	10...12	30...35
Количество кассет инфракрасных излучателей		4	5	7
Параметры кассеты	количество ламп	4	4	7
	мощность, кВт	4	4	7
Установленная мощность, кВт	инфракрасных излучателей	16	20	49
	приводов конвейера	0,37x2	0,37x2	0,75x2
	вентиляторов	0,37	0,68	0,99
Температура нагрева материалов, не более, °С		250	250	250
Частота колебаний лотка конвейера, Гц (кол/мин)		15(900)...25(1500)		
Габаритные размеры лотка, мм	длина	2530	3170	4100
	ширина	200	200	350
	высота	55	55	55
Габаритные размеры сушилки, мм	длина	2768	3440	4368
	ширина	764	764	980
	высота	1170	1170	1340
Масса, кг		490	600	900

Сушилка вибрационная с инфракрасными излучателями СВИК (рис. 1.9) применяется для сушки зернистых и порошкообразных продуктов в виброкипящем слое с энергоподводом в электромагнитном поле инфракрасного диапазона.

Техническая характеристика сушильных установок СВИК-50, СВИК-100 и СВИК-350 приведена в таблице 1.8.

Сушилка вибрационная с инфракрасными излучателями СВИК представляет собой горизонтальный вибрационный конвейер 1 с рабочим органом в виде прямоугольного лотка 2 из коррозионно-стойкой стали. Сверху над лотком стационарно расположены кассеты 3 инфракрасных излучателей, секции отвода паров 4 и секция охлаждения продукта 5. Начальный участок лотка прогревается кассетой установленной снизу.

Каждая кассета ИК-излучателей (кварцевые галогенные лампы КГТ с цветовой температурой накала 2500 К) снабжена встроенным вентилятором 6 с секторной заслонкой, который обеспечивает охлаждение контактов ламп и подачу нагретого воздуха в зону сушки. Кассеты и секции шарнирно установлены на круглой штанге для поднятия и поворота их при техническом обслуживании ламп и лотка.

Секции отвода паров и секция охлаждения материала соединены гибкими воздуховодами 7 соответственно с вытяжным и приточным вентиляторами. Поступающий в сушилку материал под действием вибрации непрерывно перемещается по лотку, последовательно проходя под кассетами ИК-излучателей и секциями отвода паров. Микроволновое инфракрасное излучение, генерируемое кварцевыми галогенными лампами, проходит сквозь слой, преобразуется в тепловую энергию, нагревает материал и выпаривает из него влагу. Воздух, подаваемый вентилятором, встроенным в кассету, проходит внутри неё по каналам, охлаждает контакты ламп, нагревается при этом и поступает в зону сушки, обеспечивая конвективный теплообмен и удаление паров выпариваемой влаги. Отвод насыщенного влагой воздуха осуществляется вытяжным вентилятором через секции отвода паров, соеди-

ненных гибкими воздуховодами с коллектором. Высушенный материал перед выгрузкой из сушилки охлаждается воздухом, подаваемым приточным вентилятором в секцию охлаждения.

Скорость транспортирования материала и время его обработки регулируется изменением скорости вращения вибраторов.

Температура лотка под кассетами контролируется контактными термомпарами, температура материала на выходе из сушилки контролируется бесконтактным датчиком (пирометром).

1.4. Обоснование способа сушки гречихи

Как уже отмечалось выше, сушка гречихи – сложная и специфическая задача. Сложной и специфической эта задача является и в силу необходимости работы в интервале от 22 до 14 % влажности, при этом значительная часть влаги содержится в поверхностных слоях семян в свободном виде, и в силу необходимости достижения высокой точности получения конечной влажности с максимальным разбросом ее по объему продукта не более 1 %. При этом к высушиваемому продукту как к исходному сырью для создания лечебных препаратов, функциональных продуктов питания и кормов, предъявляются более высокие требования по качеству (сохраняемость полезных веществ и витаминов) по сравнению с соответствующими требованиями, предъявляемыми к обычным пищевым продуктам, в том числе, к традиционной зерновой и зернобобовой продукции.

Для решения поставленной задачи необходимо разработать новый способ сушки гречихи, который позволит интенсифицировать процесс сушки, снизить энергозатраты на проведение процесса, и в то же время обеспечит высокое качество высушиваемого продукта.

Естественно, что в основе интенсификации процесса сушки должны лежать мероприятия, учитывающие закономерности явлений внутреннего влагопереноса и внешнего тепло- и влагообмена.

Комплексного воздействия на интенсификацию внешнего влагообмена и внутреннего влагопереноса можно добиться на основе оптимального сочетания технологических приемов, используемых для обезвоживания зерна в эксплуатируемых и проектируемых сушилках.



Рис. 1.11. Классификация путей интенсификации процесса сушки зерна

Обобщение литературных данных и проведенные исследования позволили разработать классификацию путей интенсификации процесса сушки зерна (рис. 1.11).[34]

В области внешнего влагообмена интенсифицировать процесс можно путем повышения температуры и скорости агента сушки, а также увеличения активной поверхности зерен, участвующей в процессе тепло- и влагообмена с агентом сушки. Для этого применяются сушильные аппараты со взвешенным слоем материала с различной гидродинамикой, которая определяет время пребывания высушиваемого материала в аппарате, допустимую температуру сушильного агента, интенсивность протекания процессов тепло- и массооб-

мена, энергетические затраты на сушку. Использование активных гидродинамических режимов позволяет существенно интенсифицировать процесс сушки без снижения экономической эффективности, обеспечивать высокое качество готового продукта, полную безопасность и технологичность процесса [9, 13, 116].

Характерным примером использования активного гидродинамического режима при разработке сушильных аппаратов является воздействие на частицы дисперсного материала центробежной силы, возникающей при движении твердой фазы по криволинейной траектории. Применение закручивающих устройств обеспечивает увеличение коэффициентов теплообмена связанного с повышением относительной скорости движения фаз в закрученном потоке в 3-4 раза по сравнению с прямолинейными потоками [9,13, 104, 116].

Поэтому можно сделать вывод о том, что эффективную и качественную сушку гречихи можно осуществить в тепло-массообменных аппаратах с активным гидродинамическим режимом, что обеспечит высокую скорость нагрева семян и небольшую продолжительность процесса обезвоживания. Это в свою очередь сократит длительность воздействия на продукт повышенных температур и сохранит питательную и биологическую ценности, в частности термолабильные витамины, т.е. повысит качество готового продукта.

1.5. Способы и аппараты для проведения процесса сушки с закрученным потоком теплоносителя

При движении дисперсного материала в аппаратах с активным гидродинамическим режимом происходит непрерывное взаимодействие частиц друг с другом и со стенкой сушилки, что приводит к увеличению относительной скорости движения взаимодействующих фаз, времени пребывания материала в аппарате, повышению концентрации твердой фазы [9, 13, 106, 116]. Осо-

бенно сильно взаимодействие между частицами при полидисперсном составе высушиваемого материала [17,133]. Это создает благоприятные условия для интенсификации тепло- и массообмена и повышения эффективности процесса сушки.

Аппараты использующие принцип закрученного потока можно разделить на пять основных групп:

- пневмотрубки с различными вставками;
- аппараты циклонного типа;
- вихревые аппараты;
- аппараты со встроенными закрученными потоками;
- спиральные прямоточные аппараты.

В пневмотрубках с винтовыми вставками закручивание осуществляют по объемной спирали [136]. Эксплуатация этого типа сушилок подтверждает ряд их преимуществ. Двигаясь по спиральной траектории, частицы отбрасываются на внешнюю стенку канала, что приводит к значительному числу соударений частиц между собой и стенкой, повышению относительной скорости, увеличению истинной концентрации и интенсификации межфазного тепло- и массообмена.

В то же время, для аппаратов этого типа характерны следующие недостатки: высокое гидравлическое сопротивление, сложность изготовления, высокий абразивный износ продукта и рабочих поверхностей аппарата, необходимость установки устройств для выделения дисперсной фазы, трудность чистки внутренних поверхностей аппарата при нарушении технологического режима.

Наиболее простыми по конструкции являются циклонные сушилки. Они представляют собой цилиндрическую или цилиндро-коническую камеру с тангенциальным вводом газовой взвеси в верхнюю часть цилиндра [18, 86, 142]. Частицы дисперсного продукта входят в тангенциальный патрубок циклона вместе с потоком сушильного агента и практически мгновенно (за 0,01...0,03 с) оказываются на внутренней стенке аппарата. Значительную часть времени

пребывания частиц материала в циклонном аппарате составляет время их движения по внутренней стенке циклона. Такая конструкция позволяет обеспечить эффективные условия взаимодействия фаз и увеличить время пребывания материала в аппарате. Важным преимуществом циклонных сушилок является их компактность: циклон ЦН-15 эквивалентен по влагосъему участку трубы длиной 15-20 м, а сушилка ЦС-600 - более 40 м [39]. Недостатком циклонных сушилок является трудность регулирования времени пребывания материала в аппарате, невысокая удерживающая способность [39, 137, 142].

Вихревые сушилки по сравнению с циклонными характеризуются лучшей сепарирующей и большей удерживающей способностью. Вихревые сушилки [48, 67, 117] обеспечивают весьма активный гидродинамический режим с высокими относительными скоростями газа и частиц, но они значительно ближе к аппаратам идеального смешения, чем циклонные сушилки и пневмотрубы.

По сравнению с циклонными сушилками они более компактны, развивают высокую поверхность контакта фаз и обладают большей удерживающей способностью. Существенным достоинством вихревых камер является различное время пребывания частиц материала в зависимости от размеров и начальной влажности, что дает возможность успешно использовать эти аппараты для обработки полидисперсных материалов с удовлетворительной равномерностью конечной влажности [69, 117]. Применение инертного носителя в аппаратах этого типа позволяет обрабатывать материалы с повышенной адгезионной способностью, жидкой или пастообразной консистенции [94].

Недостатками этого типа сушилок являются: повышенный расход сушильного агента на поддержание материала во взвешенном состоянии, невозможность сушки высоковлажных материалов [94].

Аппараты спирального типа по существу представляют собой горизонтальный пневмотранспортный канал с уменьшающимся радиусом кривизны. Газодисперсная смесь выгружается в центральной части спирального аппарата обычно через циклон, в котором происходит отделение дисперсного мате-

риала от сушильного агента.

Преимущества режима идеального вытеснения проявляются в этих аппаратах в увеличении движущей силы процесса. Интенсивное взаимодействие частиц дисперсного материала со стенкой приводит, с одной стороны, к торможению частиц, а с другой - к существенной хаотизации их движения. Все это обуславливает увеличение относительной скорости движения фаз, создание благоприятных условий для подвода тепла к частицам высушиваемого материала за счет значительной турбулизации на границе раздела фаз, а следовательно приводит к интенсификации процессов тепло- и массообмена [57,66]. Конструкция спиральной сушилки с бифилярной навивкой канала обеспечивает рекуперацию тепла по длине пневмотракта и снижение тепловых потерь в окружающую среду[52].

Помимо этого спиральные аппараты характеризуются малыми габаритами, технологичностью изготовления. К недостаткам спиральных сушилок относится незначительное время пребывания материала в зоне сушки (несколько секунд), недостаточного для удаления связанной влаги.

Аппараты со встречными закрученными потоками представляют собой вертикальную цилиндрическую камеру, в нижнюю часть которой по оси камеры через завихритель подается закрученный поток горячего сушильного агента вместе с частью влажного дисперсного материала. В верхнюю часть камеры тангенциально вводится второй поток сушильного агента со второй частью влажного материала [131]. Вращение центрального и периферийного потоков газа и материала происходит в одну сторону, но их осевое, вертикальное движение направлено внутри аппарата в разные стороны. Благодаря одностороннему вращению вторичный поток как бы подкручивает центральный поток, обеспечивая равномерность вращения сушильного агента и дисперсного материала по всей высоте аппарата.

Гидродинамика аппаратов (СВЗП) обладает значительной устойчивостью, в частности, по концентрации твердой фазы, что позволило разработать [85,] аппараты большой единичной мощности с диаметром камеры до 2 м и

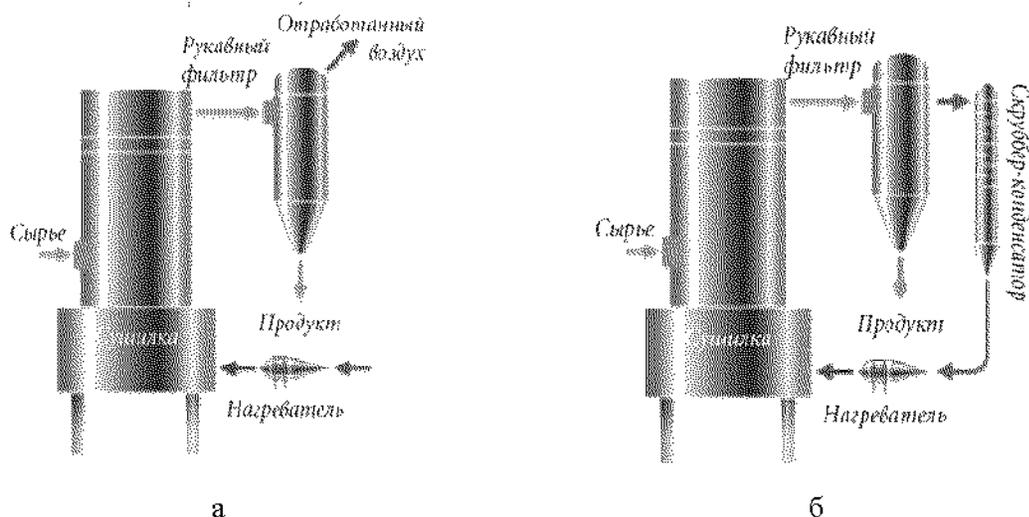
производительностью по высушиваемому продукту до 10 т/ч.

При этом эффективность улавливания мелких частиц твердой фазы составляет 98...100 % в зависимости от дисперсного состава.

Однако данные аппараты проигрывают спирально-вихревым сушилкам во времени пребывания материала в аппарате. В СВЗП время пребывания материала может достигать десятков секунд, а в спирально-вихревых камерах с регулируемым переливным порожком несколько десятков секунд, что позволяет удалять как свободную, так и связанную влагу. Но для увеличения времени пребывания материала в таких аппаратах приходится прибегать к увеличению высоты переливных порожков, что вызывает увеличение гидравлического сопротивления и залегание материала в зоне примыкания порожка к днищу камеры.

Рассмотрим основные промышленные установки для сушки с активной гидродинамикой.

Вихревая сушилка SWIRL FLUIDIZER (рис. 1.16) превосходит большинство традиционных конвективных сушилок [163].



а б
Рис. 1.12. Вихревая сушилка SWIRL FLUIDIZER
а) с открытым циклом; б) с замкнутым циклом

Сушилка SWIRLFLUIDIZER обладает следующими основными преимуществами:

- объединяет сушку и последующую обработку продукта;
- работает в непрерывном режиме;

- компактна, занимает минимум пространства;
- обеспечивает эффективный тепло- и массообмен;
- тепловые потери пренебрежимо малы;
- удобна в техническом обслуживании.

Главная часть аппарата - это сушильная камера, в которой происходит дезинтеграция сырья и испарение влаги. Через верхнюю часть цилиндрической камеры отработанный воздух, содержащий высушенные частицы, поступает в комбинированную систему очистки отработанного воздуха и отделения продукта.

Камера сушилки состоит из верхней цилиндрической и нижней конической части. В большинстве случаев сырье подается в среднюю зону. Характер потоков внутри камеры гарантирует равномерную сушку и не дает продукту попасть в воздухораспределитель.

Ввод осушающего газа в камеру сушки осуществляется тангенциально через воздухораспределитель, что обеспечивает регулируемый вихревой поток осушающего газа, поступающего в аппарат.

Конфигурация нижней части камеры и воздухораспределителя идеальна для эффективного охлаждения горячих внутренних поверхностей. Возможность такого охлаждения позволяет работать с термолабильными продуктами.

В основании воздухораспределителя установлен вертикальный вращающийся лопастной измельчитель (дезинтегратор).

Весьма перспективными в этом направлении являются вихревые камеры с дополнительными элементами, которые обладают повышенной удерживающей способностью и временем пребывания материала в аппарате.

Внутренняя гидродинамика в аппарате обеспечивает высокие относительные скорости движения фаз, что обуславливает значительную интенсивность тепломассообменных процессов.

Однако такие конструкции являются мало изученными, для них нет методик расчета, поэтому они требуют дополнительных исследований.

Сушилка аэродинамическая САД-0.4-0.8 (рис. 1.12), производительностью до 800 кг/час (при влажности сырья до 30 %). Самый дешевый способ сушки в циклонной сушилке. Сушилка состоит из утилизатора отходов (печки), системы горизонтальных и вертикальных трубопроводов, циклона и дымовой трубы.

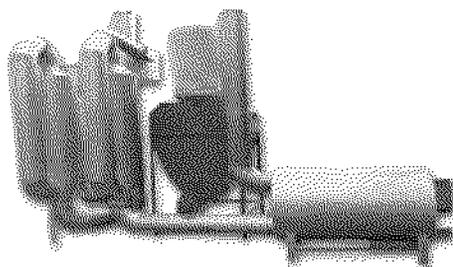


Рис. 1.13. Сушилка аэродинамическая САД-0.4-0.8

Принцип работы аэродинамической сушки: в сушке быстрый поток горячего воздуха поддерживает исходные материалы в подвешенном состоянии, где они и высушиваются. Так как скорость потока воздуха очень высока, а материалы находятся непосредственно в нем, теплообмен между воздухом и материалом очень большой.

В процессе сушки чистый холодный воздух с помощью теплогенератора нагревается и перемешивается с мокрыми материалами. Влажные опилки высушиваются в течении нескольких секунд. Далее сухие материалы выпускаются через вентилятор и циклон, а отработанный воздух выпускается в атмосферу.

Аэродинамическая сушилка (рис. 1.14) работает при температуре осушающего агента 120...150 °С. Запускается сушилка в течение нескольких минут, процесс сушки легко управляем и контролируем.



Рис. 1.14. Аэродинамическая сушилка

Сушка материала в аэродинамической установке обеспечивается интенсивным массо-воздухообменом, который является результатом технического решения данного аппарата. Также, процесс сушки ускоряется в связи с интенсивным трением частиц друг о друга в плотном слое, при движении с высокой окружной скоростью.

Скорость осушающего агента относительно частиц материала в аэродинамической сушилке составляет 25...28 м/с, что позволяет сушить древесные и сельскохозяйственные отходы, торф, лигнин и другие мелкофракционные материалы в компактной конструкции, занимающей небольшие производственные площади, обладающей низкой металлоемкостью.

Продолжительность сушки и расход энергии, при сушке в импульсном кипящем слое значительно ниже, чем в вакуум-сушилках.

Принцип действия: влажный материал поступает из загрузочного бункера, подхватывается смесью воздуха с топочными газами и поступает в сушильную камеру с закрученным кипящим слоем. Закручивание обеспечивается за счёт тангенциальной подачи продукта и специального устройства газораспределительной решётки. Высушивание продукта до его заданной конечной влажности происходит благодаря управлению временем нахождения продукта в сушильной камере, путём создания необходимой высоты кипящего слоя.

В камере материал интенсивно циркулирует до тех пор, пока высохшие частицы, как более легкие, уносятся газами в циклон. Здесь газы отделяются от высушенного материала, который удаляется через днище циклона.

Наиболее распространены однокамерные сушилки непрерывного действия.

Преимущества аэродинамических сушек в сравнении с сушильными барабанами и другими видами сушильных установок:

- компактность, намного меньшие расходы на здания, фундаменты, транспортные элементы и т.п.
- пожаробезопасность: опасность возгорания исключена ввиду высокой

скорости материала в активаторе и низкой температуры осушающего агента;

- максимальная заводская готовность, легкость монтажа;
- быстрый запуск и остановка, вывод на рабочий режим занимает несколько минут;
- высокая степень автоматизации, параметры сушки регулируются оператором с пульта;
- низкие эксплуатационные расходы;
- на выходе получаем сырье однородно мелкой, идеальной для производства топливных брикетов или гранул, фракции.

Базовая разработка нашей аэродинамической сушилки позволяет высушивать от 400 до 800 кг сухого продукта в час от первоначального содержания влаги 60 % до конечного 12...10 %, при этом энергопотребляемость 7,5...11 кВт. Увеличение входящей влажности-пропорционально уменьшает производительность. Сушилка оснащена теплогенератором с искрогасителями, работающем на отходах (дровах, щепе опилке), расход твердого топлива 60 – 80 кг/час.

Таблица 1.9

Основные характеристики аэродинамических сушилок

Тип аэродинамической сушилки	АС 400	АС 800
Производительность	400 кг/час	800 кг/час
Мощность двигателя	11 кВт	15 кВт
Влажность сырья при входе	50-60 %	50-60 %
Влажность сырья на выходе	8-12 %	8-12 %
Размер фракции сырья	1- 7 мм	1-7 мм
Температура воздуха	180-250 °С	180-250 °С
Длина	6000 мм	6000 мм
Ширина	2500 мм	2500 мм
Высота	4000 мм	4000 мм

1.6. Математическое описание движения двухфазных потоков в аппаратах с активным гидродинамическим режимом

Изучение движения частиц твердой фазы в закрученном потоке теплоносителя необходимо для расчета и анализа процесса конвективного теплообмена в вихревых и циклонных аппаратах. При движении газозвеси по криволинейной траектории, кроме гидродинамической силы, на дисперсную фазу в наибольшей степени действуют центробежные силы, отбрасывающие частицы к вогнутой стенке аппарата, и силы трения и соударения частиц между собой и со стенкой. Воздействие этих сил приводит к торможению частиц, перераспределению скоростей между частицами различных фракций материала и увеличению относительной скорости газа и частиц. Таким образом, закрученный поток газозвеси полидисперсного материала отличается более сложной формой движения сплошной и дисперсной фаз. Поэтому наиболее точное представление о поведении твердой фазы в их объеме позволит управлять процессом сушки и определить пути его интенсификации.

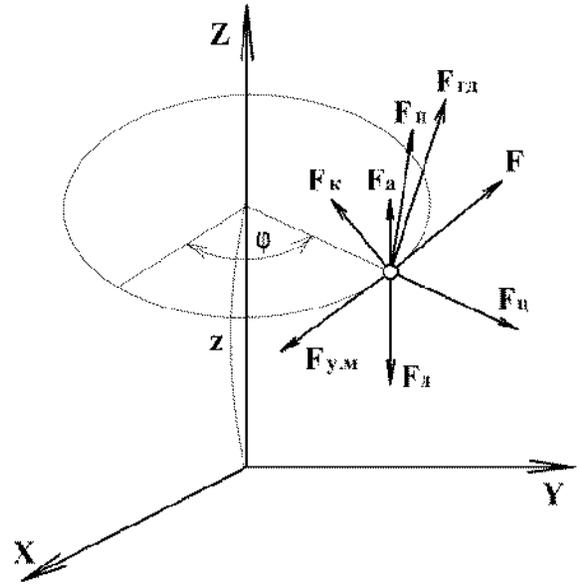


Рис. 1.15. Схема действия основных сил на частицу, движущуюся в закрученном потоке теплоносителя

В процессе движения в аппарате с закрученным потоком теплоносителя происходит сушка дисперсного материала и в результате удаления влаги масса частиц непрерывно уменьшается. Поэтому более корректным исходным уравнением является уравнение движения тела переменной массы [19]:

$$\frac{d}{d\tau}(m\vec{v}) = m\vec{v}_1 \frac{dm}{d\tau} + \sum \vec{F}. \quad (1.13)$$

В общем случае на частицу, движущуюся во вращающемся потоке газа,

действуют следующие силы (рис. 1.21):

центробежная

$$\vec{F}_c = m\vec{\omega} [\vec{\omega} \vec{r}], \quad (1.14)$$

гидродинамического сопротивления

$$F_{\text{сд}} = \xi S_{\text{сд}} \rho \frac{(\vec{v} - \vec{w})^2}{2}, \quad (1.15)$$

тяжести

$$\vec{F}_g = m\vec{g}, \quad (1.16)$$

переносная Кориолиса

$$\vec{F}_k = 2m[\vec{\omega} \vec{u}], \quad (1.17)$$

поперечная Магнуса-Жуковского

$$\vec{F}_{\text{М.Ж}} = \rho \vec{u} \oint_S \text{rot}_n \vec{u} dS, \quad (1.18)$$

подъемная Архимеда

$$\vec{F}_A = m\vec{g} \frac{\rho}{\rho_M}. \quad (1.19)$$

Кроме того, при взаимодействии частицы со стенками аппарата и соседними частицами действуют следующие силы:

трения скольжения

$$\vec{F}_{TC} = f\vec{F}_n, \quad (1.20)$$

трения качения

$$\vec{F}_{TK} = \frac{2f'}{d}\vec{F}_n, \quad (1.21)$$

удара частицы о стенку

$$\vec{F}_{\text{в.ст}} = f(1 + k_n)m \frac{\vec{v}_n}{\Delta \tau}, \quad (1.22)$$

удара частицы о другую частицу такого же размера

$$F_{\text{в.м}} = (1 - k^2) \frac{mm'}{2(m + m')} \frac{(v - v')^2}{\Delta r}, \quad (1.23)$$

где r, ω – радиус-вектор и угловая скорость движения частицы; f, f' – коэффициенты трения скольжения и качения соответственно; k – коэффициент восстановления после соударения; k_n – коэффициент восстановления нормальной составляющей скорости; v_n – нормальная составляющая скорости к моменту удара; $\Delta \tau$ – длительность контакта; m', v' – масса и скорость соударяемой частицы; S – путь обтекания газа вдоль поверхности.

Подставляя действующие силы в уравнение (1.13) и, разложив их на составляющие, получим в цилиндрических координатах систему дифференциальных уравнений, описывающих движение частицы с изменяющейся массой [17, 83]:

$$\begin{aligned}
& m \left[\frac{d^2 r}{d\tau^2} - r \left(\frac{d\phi}{d\tau} \right)^2 \right] + \frac{dr}{d\tau} \cdot \frac{dm}{d\tau} = -\xi S_{\text{МД}} \rho \frac{(v_r - \omega_r)}{2} + m \frac{v_\phi^2}{r} \pm \\
& \pm \rho u_\phi \iint \text{rot}_n u_\phi dS \pm (1 - k^2) \frac{mm'}{2(m + m')} \cdot \frac{(v_T - v'_T)^2}{2} + v_{1r} \frac{dm}{d\tau} \\
& m \left[r \frac{d^2 \phi}{d\tau^2} + 2 \frac{dr}{d\tau} \cdot \frac{d\phi}{d\tau} \right] + \frac{d\phi}{d\tau} \cdot \frac{dm}{d\tau} = \xi S_{\text{МД}} \rho \frac{(v_\phi - \omega_\phi)^2}{2} + m \frac{v_\phi^2}{r} \pm \\
& \pm \rho u_r \iint_S \text{rot}_n u_\phi dS + 2m \frac{v_\phi u_\phi}{r} \pm (1 - k^2) \frac{mm'}{2(m + m')} \cdot \frac{(v_\phi - v'_\phi)^2}{r \text{tg} \Delta \phi} + v_{1\phi} \frac{dm}{d\tau} \quad (1.24) \\
& m \frac{d^2 z}{d\tau^2} + \frac{dz}{d\tau} \cdot \frac{dm}{d\tau} = -mg + mg \frac{\rho}{\rho_M} \pm \xi S_{\text{МД}} \rho \frac{(v_z - \omega_z)^2}{2} \pm \\
& \pm \rho \sqrt{u_T^2 + u_\phi^2 + u_z^2} \iint_S \text{rot}_n \sqrt{u_T^2 + u_\phi^2 + u_z^2} dS \pm \\
& \pm (1 - k^2) \frac{mm'}{2(m + m')} \cdot \frac{(v_z - v'_z)^2}{\Delta z} + v_{1z} \frac{dm}{d\tau}
\end{aligned}$$

Для описания процесса движения частицы с изменением массы в общем случае применяется уравнение Мещерского [137]

$$m \frac{d\vec{V}}{d\tau} = \vec{F}_p + \frac{dm}{d\tau} \vec{V}_p, \quad (1.25)$$

где m – масса частицы, кг; τ – время, с; \vec{F}_p – равнодействующая всех внешних сил, действующих на частицу, Н; \vec{V} – вектор абсолютной скорости частицы,

$\text{м/с}; \vec{V}_p$ – вектор скорости отбрасываемых от частицы масс, м/с .

Из уравнения (1.25) следует, что реактивная сила может возникнуть лишь при равномерном истечении газов с поверхности частицы за счет лобового эффекта, а так как в процессе движения частицы вращаются вокруг своей оси [136], то лобовой эффект и реактивная сила отсутствуют. Уравнение (1.25) принимает вид:

$$m \frac{d\vec{V}}{d\tau} = F_p. \quad (1.26)$$

Равнодействующая всех внешних сил складывается из силы аэродинамического сопротивления, силы тяжести, силы, возникающей из-за градиента – давления, силы Архимеда, силы Магнуса, силы, возникающей из-за неравномерности движения. В условиях вихревых циклонных камер основной, из них является сила аэродинамического сопротивления:

$$F = \xi F' \cdot \rho \frac{|u| \bar{u}}{2g}, \quad (1.27)$$

где ξ – коэффициент аэродинамического сопротивления частицы; F' – площадь меделева сечения, м^2 ; ρ – плотность газовой среды кг/м^3 ; $|u| \bar{u}$ – соответственно вектор и его модуль относительной скорости частицы.

Таким образом, уравнение движения (1.26) с учетом силы тяжести частицы принимает вид:

$$m \frac{dv}{d\tau} = \xi F' \gamma \frac{|u| \bar{u}}{2g} + mg. \quad (1.28)$$

Коэффициент аэродинамического сопротивления частиц в этом случае принимается равным коэффициенту сопротивления шара, зависящему от скорости обтекания. Существенное влияние на коэффициент сопротивления частиц оказывает неизотермичность процесса. Как показали многочис-

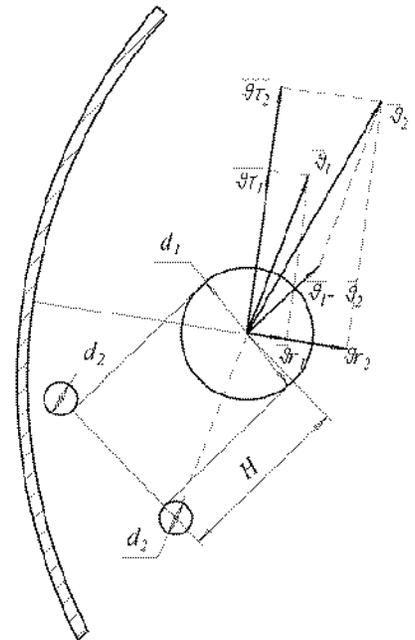


Рис. 1.18. Схема предельных положений частиц, при кото-

ленные исследования [136], неизотермичность проявляется в изменении пограничного слоя частицы, вязкость которого зависит от температуры.

Таким образом, определение всех сил, входящих в уравнение (1.13) не вызывает затруднений. Но реальные дисперсные смеси всегда полидисперсны, т. е. в элементарном объеме содержатся частицы разных размеров.

Из анализа механизма движения сыпучего вещества в потоке, а также из опытных данных известно, что частицы полидисперсного материала при движении в двухфазном потоке претерпевают непрерывные соударения.

Попытки замены полидисперсного материала монодисперсным путем усреднения частиц по размерам приводят к значительным ошибкам в расчетах и допустимы только для материала с гранулометрическим составом близким к монодисперсному.

Очевидно, для учета влияния полидисперсности материала на гидродинамику необходимо в дифференциальное уравнение включить силу, возникающую в результате взаимодействия частицы с частицами других фракций $F_{\text{вд}}$. Для определения силы взаимодействия используем методику, изложенную в [17].

Сначала рассмотрим наиболее простой случай, когда в аппарате с закрученными потоками движется полидисперсный материал, состоящий из двух фракций. Примем следующие допущения: размер частиц велик, что турбулентные пульсации не оказывают существенного влияния на характер их движения; частицы имеют шарообразную форму.

Для того чтобы в течение промежутка времени $\partial\tau$ произошло столкновение между крупными и мелкими частицами, необходимо, чтобы в начале этого промежутка центр мелкой частицы находился внутри цилиндра, основанием которого служит круг диаметром d_1+d_2 , а образующая равна $|\mathcal{A}_1 - \mathcal{A}_2| \cdot \partial\tau$. Индексы 1 и 2 обозначают соответственно крупные и мелкие частицы (рис. 1.28).

Объем цилиндра равен:

$$V_y = |\bar{g}_2 - \bar{g}_1| d\tau \cdot (d_1 - d_2)^2 \cdot \frac{\pi}{4}. \quad (1.29)$$

Количество мелких частиц, центры которых в начале промежутка времени $d\tau$ находятся в пределах данного объема:

$$dn_2 = \frac{3 \cdot \beta_{T_2} |\bar{g}_2 - \bar{g}_1| \cdot (d_1 + d_2)^2 \cdot d\tau}{2 \cdot d_2^3}, \quad (1.30)$$

где β_{T_2} – объемная концентрация мелкой фракции.

Свяжем каждый выделенный объем с крупной частицей и предположим, что они не пересекаются. Тогда среднее время свободного пробега крупной частицы между соударениями составит:

$$\tau_1 = \frac{2}{3} \cdot \frac{d_2^3}{(d_1 - d_2) \cdot |\bar{g}_2 - \bar{g}_1| \cdot \beta_{T_2}}. \quad (1.31)$$

Время свободного пробега мелкой частицы можно определить, приняв, что крупная частица одновременно испытывает удар только одной мелкой частицы. Тогда за время $d\tau$ крупные и мелкие частицы испытывают одинаковое количество соударений, равное dN_1 / dN_2 .

Учитывая, что

$$\frac{dN_1}{dN_2} = \frac{\beta_{T_1}}{\beta_{T_2}} \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^3 \quad (1.32)$$

для времени свободного пробега мелкой частицы получаем:

$$\tau_2 = \frac{2}{3} \cdot \frac{d_1^3}{(d_1 + d_2) \cdot |\bar{g}_2 - \bar{g}_1| \cdot \beta_{T_1}}. \quad (1.33)$$

Основываясь на положении теории удара [19, 20], можно определить изменение скорости частицы в результате одиночного удара

$$\Delta \bar{g}_1 = (1 + k) \cdot \frac{m_2}{m_1 + m_2} \cdot (\bar{g}_2 - \bar{g}_1), \quad (1.34)$$

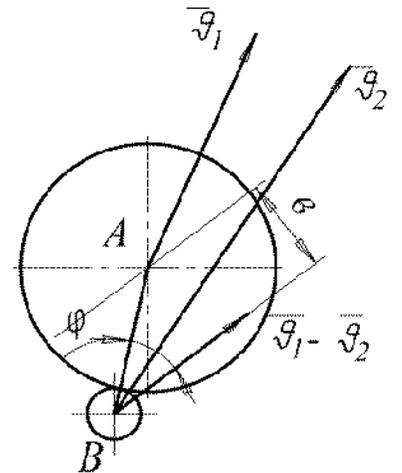


Рис. 1.19. Схема взаимодействия частиц при косом ударе

$$\Delta \bar{\mathcal{G}}_2 = (1+k) \cdot \frac{m_2}{m_1+m_2} \cdot (\bar{\mathcal{G}}_1 - \mathcal{G}_2), \quad (1.35)$$

где k – коэффициент восстановления, величина которого зависит от упругих свойств соударяющихся тел; $k=1$ – отвечает вполне упругому удару; $0 < k < 1$ – не вполне упругий удар.

Формулы (1.34) и (1.35) относятся к нормальным составляющим скоростей соударяющихся тел. В общем случае удар будет косым. При косом ударе ($\psi \neq 0$) в скоростях появятся поперечные составляющие. Так как частица испытывает частые соударения, можно допустить, что поперечные составляющие скоростей компенсируют друг друга и в первом приближении ими можно пренебречь.

При абсолютно гладких поверхностях тангенциальные составляющие не изменяются, при шероховатых поверхностях тангенциальные составляющие изменяются и появляются моменты вращения. При косом ударе изменяются и появляются моменты вращения. При косом ударе изменение скоростей частиц зависит от угла ψ (рис. 1.19). Тогда скорость после соударений будет:

$$\mathcal{G}_{1II} = \mathcal{G}_1 \cdot \sin^2 \psi + \frac{(m_1 - km_2) \cdot m_2 (1+k) \mathcal{G}_2}{m_1 + m_2} \cdot \cos^2 \psi. \quad (1.36)$$

Частота соударений при данном значении b пропорциональна площади кольца радиусом, равным b и шириной db .

Найдем среднее значение \mathcal{G}_{1II} :

$$(\bar{\mathcal{G}}_{1II})_{cp} = \frac{4}{\pi(d_1 + d_2)^2} \cdot \int_0^{\frac{d_1+d_2}{2}} \bar{\mathcal{G}}_{1II} \cdot 2\pi \cdot b \cdot db, \quad (1.37)$$

$$(\bar{\mathcal{G}}_{1II})_{cp} = \frac{1}{2} \left(\bar{\mathcal{G}}_1 \frac{(m_1 + km_2) \cdot \bar{\mathcal{G}}_1 + m_2 (1+k) \cdot \bar{\mathcal{G}}_2}{m_1 + m_2} \right) \quad (1.38)$$

откуда

$$\Delta \bar{\mathcal{G}}_1 = \frac{1+k}{2} \cdot \frac{m_2}{m_1+m_2} \cdot (\bar{\mathcal{G}}_2 - \bar{\mathcal{G}}_1), \quad (1.39)$$

Аналогично для мелкой частицы:

$$\Delta \bar{\mathcal{G}}_1 = \frac{1+k}{2} \cdot \frac{m_1}{m_1+m_2} \cdot (\bar{\mathcal{G}}_1 - \bar{\mathcal{G}}_2). \quad (1.40)$$

Тогда изменение скоростей в проекциях на тангенциальную и радиальнонаправленные составит:

$$\begin{aligned} \Delta \bar{\mathcal{G}}_{\psi 1} &= \frac{1+k}{2} \cdot \frac{m_2}{m_1+m_2} \cdot (\bar{\mathcal{G}}_{\psi 2} - \bar{\mathcal{G}}_{\psi 1}) = \frac{1+k}{2} \cdot \frac{d_2^3}{d_1^3+d_2^3} \cdot (\bar{\mathcal{G}}_{\psi 2} - \bar{\mathcal{G}}_{\psi 1}), \\ \Delta \bar{\mathcal{G}}_{r1} &= \frac{1+k}{2} \cdot \frac{m_2}{m_1+m_2} \cdot (\bar{\mathcal{G}}_{r2} - \bar{\mathcal{G}}_{r1}) = \frac{1+k}{2} \cdot \frac{d_2^3}{d_1^3+d_2^3} \cdot (\bar{\mathcal{G}}_{r2} - \bar{\mathcal{G}}_{r1}), \\ \Delta \bar{\mathcal{G}}_{\psi 2} &= \frac{1+k}{2} \cdot \frac{m_1}{m_1+m_2} \cdot (\bar{\mathcal{G}}_{\psi 1} - \bar{\mathcal{G}}_{\psi 2}) = \frac{1+k}{2} \cdot \frac{d_1^3}{d_1^3+d_2^3} \cdot (\bar{\mathcal{G}}_{\psi 1} - \bar{\mathcal{G}}_{\psi 2}), \\ \Delta \bar{\mathcal{G}}_{r2} &= \frac{1+k}{2} \cdot \frac{m_1}{m_1+m_2} \cdot (\bar{\mathcal{G}}_{r1} - \bar{\mathcal{G}}_{r2}) = \frac{1+k}{2} \cdot \frac{d_1^3}{d_1^3+d_2^3} \cdot (\bar{\mathcal{G}}_{r1} - \bar{\mathcal{G}}_{r2}). \end{aligned} \quad (1.41)$$

При движении частицы испытывают довольно частые соударения. Это позволяет в первом приближении заменить дискретное воздействие фракций друг на друга непрерывно действующей силой, величина которой равна:

$$F_{y\partial_i} = \frac{\Delta \bar{\mathcal{G}}_i}{\tau_i} m_i, \quad (i=1,2), \quad (1.42)$$

где $\Delta \bar{\mathcal{G}}_i$ – изменение скорости частицы за счет одиночного соударения; m_i – масса частицы; τ_i – время между соударениями.

Подставляя в (1.42) значения $\Delta \bar{\mathcal{G}}_i$, τ_i из (1.31), (1.33) и (1.41), получим проекции силы, вызванной взаимодействием частиц полидисперсного материала.

$$\begin{aligned} F_{y\partial_{\psi 1}} &= \frac{3}{4}(1+k) \cdot \frac{(d_1+d_2)^2}{d_1^3+d_2^3} \cdot \beta_{T_2} |\mathcal{G}_2 - \mathcal{G}_1| \cdot (\mathcal{G}_{\psi 2} - \mathcal{G}_{\psi 1}), \\ F_{y\partial_{r1}} &= \frac{3}{4}(1+k) \cdot \frac{(d_1+d_2)^2}{d_1^3+d_2^3} \cdot \beta_{T_2} |\mathcal{G}_2 - \mathcal{G}_1| \cdot (\mathcal{G}_{r2} - \mathcal{G}_{r1}), \\ F_{y\partial_{\psi 2}} &= \frac{3}{4}(1+k) \cdot \frac{(d_1+d_2)^2}{d_1^3+d_2^3} \cdot \beta_{T_2} |\mathcal{G}_1 - \mathcal{G}_2| \cdot (\mathcal{G}_{\psi 1} - \mathcal{G}_{\psi 2}), \end{aligned} \quad (1.43)$$

$$F_{y\partial r_2} = \frac{3}{4}(1+k) \cdot \frac{(d_1+d_2)^2}{d_1^3+d_2^3} \cdot \beta_{T_2} |\mathcal{G}_1 - \mathcal{G}_2| \cdot (\mathcal{G}_{r_1} - \mathcal{G}_{r_2}).$$

Аналогично могут быть получены формулы для определения сил взаимодействия для дисперсного материала, состоящего из любого конечного числа монодисперсных фракций. В этом случае уравнения движения частиц должны быть переписаны в виде:

$$F_{y\partial \psi_i} = \frac{3}{4}(1+k) \cdot \sum_{j=1}^n \frac{(d_i+d_j)^2}{d_i^3+d_j^3} \cdot \beta_{T_2} |\mathcal{G}_j - \mathcal{G}_i| \cdot (\mathcal{G}_{\psi_j} - \mathcal{G}_{\psi_i}), \quad (1.44)$$

$$F_{y\partial r_i} = \frac{3}{4}(1+k) \cdot \sum_{j=1}^n \frac{(d_i+d_j)^2}{d_i^3+d_j^3} \cdot \beta_{T_2} |\mathcal{G}_j - \mathcal{G}_i| \cdot (\mathcal{G}_{r_j} - \mathcal{G}_{r_i}). \quad (1.45)$$

Подставляя значение проекций сил, вызванных взаимодействием частиц полидисперсного материала в (1.13), получим дифференциальные уравнения движения частиц в сушильной камере с учетом соударений. В цилиндрических координатах система уравнений имеет вид:

$$\begin{aligned} \mathcal{G}_{r_i} &= \frac{\delta \mathcal{G}_{r_i}}{\delta r} - \frac{\mathcal{G}_{\psi_i}^2}{r} = \frac{3}{4} \cdot \xi_i \cdot \frac{\rho}{\rho_T} \cdot \frac{1}{d_i} \cdot |w - \mathcal{G}_i| \cdot (w_r - \mathcal{G}_{r_i}) + \\ &+ \frac{3}{4}(1+k) \cdot \sum_{j=1}^N \frac{(d_i+d_j)^2}{d_i^3+d_j^3} \cdot \beta_{T_j} \cdot |\mathcal{G}_j - \mathcal{G}_i| \cdot (\mathcal{G}_{r_j} - \mathcal{G}_{r_i}), \\ \mathcal{G}_{\psi_i} &= \frac{\delta \mathcal{G}_{\psi_i}}{\delta r} + \frac{\mathcal{G}_{r_i} \cdot \mathcal{G}_{\psi_i}}{r} = \frac{3}{4} \cdot \xi_i \cdot \frac{\rho}{\rho_T} \cdot \frac{1}{d_i} \cdot |w - \mathcal{G}_i| \cdot (w_{\psi} - \mathcal{G}_{\psi_i}) + \\ &+ \frac{3}{4}(1+k) \cdot \sum_{j=1}^N \frac{(d_i+d_j)^2}{d_i^3+d_j^3} \cdot \beta_{T_j} \cdot |\mathcal{G}_j - \mathcal{G}_i| \cdot (\mathcal{G}_{\psi_j} - \mathcal{G}_{\psi_i}). \end{aligned} \quad (1.46)$$

Полученную систему необходимо дополнить уравнениями определения объемной концентрации в сушильной камере, граничными и начальными условиями.

Расчет скорости движения полидисперсного материала в сушильной камере с закрученными потоками по уравнению (1.46) требует знания действительных значений объемной концентрации твердой фазы в зависимости от радиуса кривизны, граничных и начальных условий, что является весьма не

простой задачей. Для оценочных расчетов действительное значение объемной концентрации можно определить через среднее значение величины массовой расходной концентрации.

1.7. Тепло- и массообмен при сушке дисперсных материалов в аппаратах со сложным гидродинамическим режимом

В реальных условиях процесса конвективной сушки в вихревых камерах тепло- и массообмен не является эквивалентным, т.к. часть тепла, подводимого к частице материала расходуется на испарение влаги, нагрев материала и преодоление энергии связи влаги с материалом, т.е. с испарившейся влагой теплота возвращается в газовую фазу частично. Таким образом, действительные коэффициенты тепло- и массоотдачи меньше эквивалентных и определяются некоторыми эффективными значениями.

Связь между эквивалентными и эффективными коэффициентами тепло- и массоотдачи устанавливается из баланса при обмене теплотой материала и газа за бесконечно малый промежуток времени определяется следующими зависимостями, полученными авторами [57].

В результате термодинамического анализа были получены следующие уравнения связи:

для эффективных коэффициентов массоотдачи

$$\beta_{\text{эф}} = \beta - \frac{\rho_V [(c_T + c_{ж} \cdot C) d\theta + \sigma \cdot q_i \cdot dX]}{\rho \cdot S_Y (r_0 + c_{II} t - c_{ж} \cdot \theta) (X' - X) d\tau}, \quad (1.47)$$

для эффективных коэффициентов теплопередачи

$$\alpha_{\text{эф}} = \alpha - \frac{\rho_V [(c_T + c_{ж} \cdot C) d\theta + \sigma \cdot q_i \cdot dX]}{S_Y (t - t') d\tau}. \quad (1.48)$$

При использовании в расчетах уравнений теплоотдачи и массоотдачи

$$dQ = \alpha (t - t') S' \cdot d\tau, \quad (1.49)$$

$$dw = \beta_x (X' - X) S \cdot d\tau, \quad (1.50)$$

подставляя в них соответственно значения эффективных коэффициентов теплоотдачи и массоотдачи из уравнений (1.47) и (1.48), можно рассчитывать длительность процесса сушки или требуемый рабочий объем аппарата.

Для аппаратов со стесненными потоками дисперсной фазы или при высокой концентрации материала в газе (полувзвешенный, взвешенный, вихревой слой) или при изменении структуры высушиваемого материала, эффективные значения коэффициентов тепло- и массообмена оказываются также меньше эквивалентных, что тоже обусловлено неэквивалентностью тепло- и массообмена.

На практике эффективные коэффициенты для случаев удаления совместно свободной и связанной влаги при высоких концентрациях твердой фазы в потоке, что также характерно для вихревых камер, рассчитываются по критериальным зависимостям, полученным в результате обработки экспериментальных данных.

Например, в работе [3] для аппаратов с кипящим слоем в результате обобщения многочисленных экспериментальных данных получены следующие уравнения для определения коэффициентов теплоотдачи:

$$Nu = 0,016(Re/\varepsilon)^{1,3} \cdot Pr^{0,33} \text{ при } \frac{Re}{\varepsilon} < 200, \quad (1.51)$$

$$Nu = 0,4(Re/\varepsilon)^{0,67} \cdot Pr^{0,33} \text{ при } \frac{Re}{\varepsilon} > 200, \quad (1.52)$$

Эти уравнения можно использовать для оценки коэффициентов теплообмена в других типах аппаратов с порозностью слоя не менее 0,9.

Для более точных расчетов целесообразно пользоваться опытными данными, полученными для конкретных видов продуктов и конструкций сушилок. коэффициенты тепло- и массоотдачи для условий сушки в вихревой камере существенно меньше, чем для условий спирального канала. Это объясняется тем, что материал, входящий в вихревую камеру, содержит в основном связанную влагу, поэтому резко возрастает неэквивалентность тепло- и массообмена. Кроме того, в вихревой камере существенно выше стеснен-

ность потока дисперсной фазы и связанная с этим неоднородность структуры потока газозвеси.

Нам представляется, что при изменении конструкции вихревых камер, значения эффективных коэффициентов тепло- и массоотдачи должны определяться по зависимостям, которые можно получить обрабатывая экспериментальные данные по сушке конкретных видов материалов в вихревых камерах.

1.8. Основные выводы, постановка цели и задач исследования

На основании проведенного анализа можно сделать вывод о том, что эффективную и качественную сушку гречихи можно осуществить в тепло-массообменных аппаратах с активным гидродинамическим режимом в аппаратах с закрученным потоком теплоносителя. Это сократит длительность воздействия на продукт повышенных температур и сохранит питательную и биологическую ценности, в частности незаменимые аминокислоты, т.е. повысит качество готового продукта. В соответствии с этим поставлена цель и задачи исследования.

Целью диссертационной работы является исследование процесса сушки гречихи в аппарате с закрученным потоком теплоносителя и совершенствование на этой основе процесса и оборудования для его осуществления.

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи:

- экспериментальное исследование свойств гречихи как объекта сушки;
- исследование и установление кинетических закономерностей процесса сушки гречихи в аппарате с закрученным потоком теплоносителя;
- исследование и оценка основных факторов, оказывающих наибольшее влияние на процесс сушки гречихи в аппарате с закрученным потоком теплоносителя;
- статистическое определение оптимальных режимов работы экспериментальной сушильной установки, позволяющее в широком диапазоне изменения входных параметров обеспечить максимальную эффективность

сушки гречихи;

- разработка математического описания процесса сушки гречихи в аппарате с закрученным потоком теплоносителя

- разработка высокоинтенсивных сушильных установок с закрученными потоками теплоносителя для сушки дисперсных материалов;

- разработка линии комплексной переработки гречихи;

- разработка способа сушки дисперсных материалов в сушилках с закрученным потоком теплоносителя;

- разработка способа автоматического управления процессом сушки дисперсных материалов с рециркуляцией теплоносителя;

- проведение промышленных испытаний процесса сушки гречихи в аппарате с закрученным потоком теплоносителя.

ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ГРЕЧИХИ КАК ОБЪЕКТА СУШКИ

В основе выбора конкретного способа сушки и его аппаратного оформления лежит комплексный анализ свойств высушиваемого дисперсного материала [13, 35, 76, 85, 127]. Важную роль при этом играет классификация материалов как объектов сушки, в соответствии с которой все влажные материалы в зависимости от их основных коллоидно-физических свойств делят на три вида: типичные коллоидные тела, капиллярно-пористые тела, капиллярно-пористые коллоидные тела [128]. Изучение высушиваемых материалов как объектов сушки является одним из важнейших направлений интенсификации процессов сушки, позволяет выбрать наиболее рациональный аппарат, обеспечивающий необходимое для сушки время и активный гидродинамический режим. Свойства влажных материалов как объектов сушки характеризуется рядом технологических, гигротермических, структурных, гидродинамических и теплофизических показателей.

Знание этих характеристик необходимо для научного обоснования рациональных методов обработки и оптимальных режимов процессов, инженерного расчета процессов и аппаратов, а также создания современных систем автоматического регулирования. Технологические и гидродинамические характеристики определяют режимные параметры процесса сушки в реальных сушильных установках. Характер и интенсивность протекания тепло-массообменных процессов при этом определяют теплофизические, гигротермические и физико-механические (структурные) характеристики материалов.

2.1. Исследование физико-механических свойств гречихи

Важными характеристиками дисперсных материалов являются размеры и форма частиц, распределение их по гранулометрическому составу, плотность и порозность, угол естественного откоса и структура, знание которых

определяет такие характеристики как сыпучесть, транспортабельность, слеживаемость и хранимость. Не зная их, невозможно сделать правильный выбор интенсивности пневморезжима и рационально сконструировать элементы сушильного аппарата.

2.1.1. Определение плотности

Плотность сыпучих материалов зависит от химического состава, структуры и влажности. Эксперимент по определению плотности гречихи проводился при помощи пикнометра (рис. 2.1) методом гидростатического взвешивания.

Эксперимент проводили согласно ГОСТ 22524-77 следующим образом. Отбирали подряд три навески массой по 5 г каждая. Взвешивали на аналитических весах и помещали каждую навеску в отдельности в сетчатую корзину, изготовленную из белой жести толщиной 0,5...0,7 мм, и закрывали крышкой из того же материала. Перед началом испытания определяли массу корзинки с подвесами. Затем корзинку опускали в мерный цилиндр, заполненный этиловым эфиром, и находящийся в термостате с температурой воды $293 \pm 1,5$ К. Жидкость в цилиндре перемешивали с целью удаления из корзинки с продуктом пузырьков воздуха. Отмечали показания весов с помощью гирь, навешиваемых на плечо коромысла.

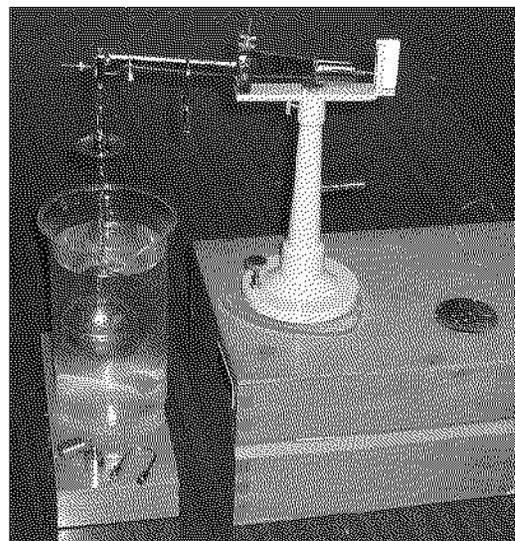


Рис. 2.1. - Пикнометр

Объем гречихи в каждой навеске V , м^3 вычисляли по формуле

$$V = \frac{m_n - m_g}{\rho_{жс}}, \quad (2.1)$$

где m_n, m_g – масса соответственно продукта и груза, кг;

$\rho_{эс}$ – плотность этилового эфира при 20 °С, кг/м³.

Плотность гречихи в каждой навеске ρ , кг/м³ определяли по формуле

$$\rho = \frac{m_n}{V}, \quad (2.2)$$

где m_n – масса навески, кг;

V – объем навески, м³.

За окончательный результат испытания принимали средне арифметическое результатов трех параллельных определений.

Зависимость плотности гречихи ρ от влажности W^c представлена на рис. 2.2.

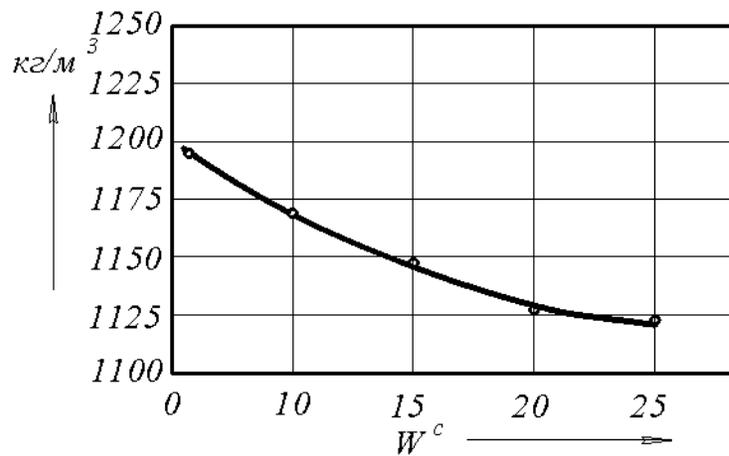


Рис.2.2. - Зависимость плотности гречихи ρ от влажности W^c

Приведенные данные показывают, что с увеличением влажности плотность уменьшается и носит криволинейный характер, что, видимо, обусловлено не только количественным изменением воды, а, главным образом, качественным ее состоянием.

2.1.2. Изучение насыпной плотности

Насыпная плотность гречихи – это масса единицы занимаемого объема. Она зависит от плотности и влажности отдельных частиц, их формы, шероховатости, от фракционного состава и необходима для расчета производительности машин, транспортных элементов, емкостей и т. д. [35, 78].

Насыпная плотность определялась с помощью литровой пурки при температуре окружающего воздуха $293 \pm 1,5$ К [78]. Измерения производились для массы частиц под действием гравитационной силы. Расчет производился по формуле:

$$\rho_n = \frac{G}{V}, \quad (2.3)$$

где ρ_n – насыпная плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$;

G – масса образца, кг;

V – объем образца ($0,001 \text{ м}^3$).

Результаты опытов представлены на рис. 2.3.

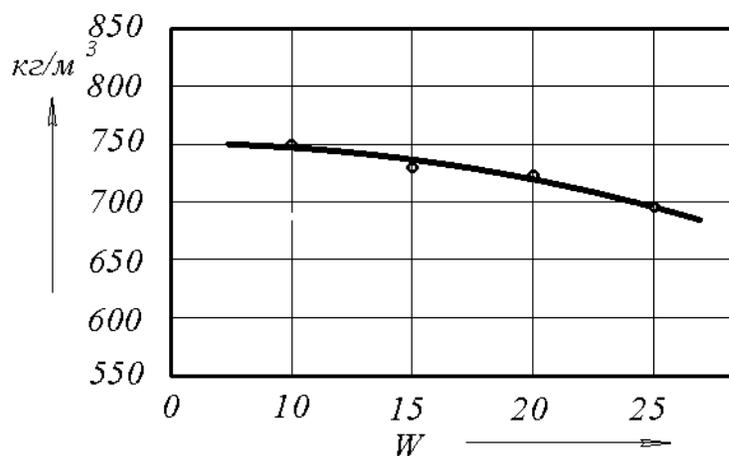


Рис.2.3. - Зависимость плотности гречихи от влажности

Из графика видно, что с повышением влажности W от 10 до 25 % насыпная плотность снижается.

2.1.3. Определение коэффициента плотности укладки

Отношение насыпной плотности материала к средней плотности материала называется коэффициентом плотности укладки и определяется как

$$K = \frac{\rho_n}{\rho}, \quad (2.4)$$

где ρ_n – насыпная плотность слоя, кг/м^3 ;

ρ – средняя плотность гречихи, кг/м^3 .

На рис. 2.4 приведена зависимость коэффициента плотности укладки K гречихи от влажности W , которая показывает, что с увеличением влажности гречихи W от 0 до 30 % коэффициент плотности укладки увеличивается от 0,64 до 0,62.

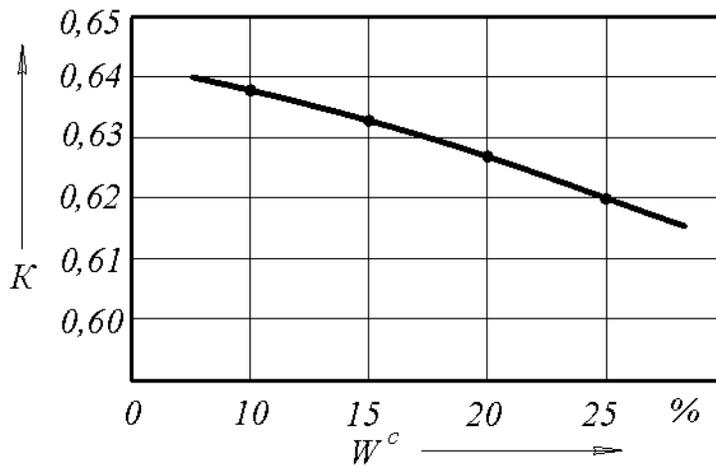


Рис. 2.4. - Зависимость коэффициента плотности укладки гречихи от влажности

На величину плотности укладки влияет способ загрузки, коэффициент внешнего трения, форма частиц. При воздействии статических и динамических нагрузок на аппарат находящаяся в нем масса уплотняется.

2.1.4. Исследование порозности слоя

Порозность слоя гречихи определяется как отношение объема пор к общему объему слоя

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_n}{\rho}, \quad (2.5)$$

где ρ_n – насыпная плотность продукта, кг/м³;

ρ – удельный вес продукта, кг/м³.

Как следует из изложенного, порозность слоя в значительной степени зависит от формы, шероховатости частиц и фракционного состава материала.

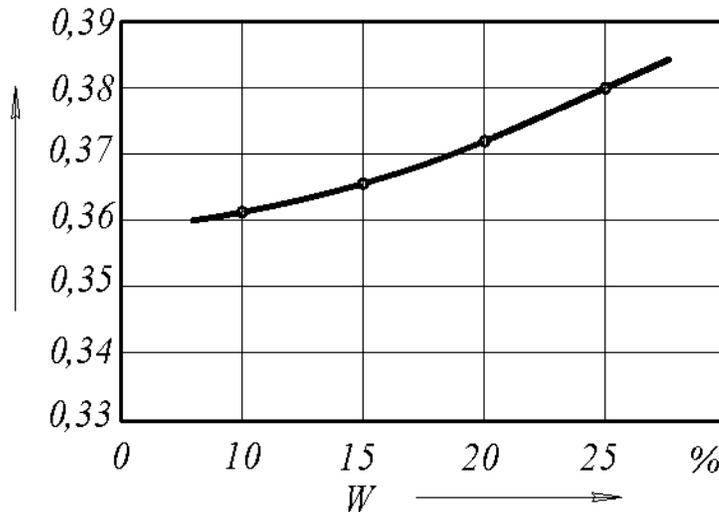


Рис. 2.5. - Зависимость порозности слоя гречихи от влажности

На рис. 2.5 приведена зависимость порозности слоя ε гречихи от влажности W° , которая показывает, что с увеличением влажности W от 0 до 30 % порозность слоя ε уменьшается от 0,91 до 0,75.

2.1.5. Определение углов естественного откоса

Сыпучесть дисперсных материалов обусловлена свободой перемещения одной частицы относительно другой при перемещении всего слоя и характеризуется углом естественного откоса, т. е. наибольшим углом, который может образовывать свободная поверхность сыпучего материала с горизонтальной плоскостью. Показателем подвижности сыпучих материалов является также коэффициент внутреннего трения f , численно равный тангенсу угла внутреннего трения материала $f = \operatorname{tg} \varphi$. Углом внутреннего трения φ называется

угол наклона к оси абсцисс линии, выражающей зависимость предельных касательных напряжений τ от величины нормальных напряжений σ в сыпучем материале. Для идеально сыпучих тел угол естественного откоса равен углу внутреннего трения, а для связанных больше угла внутреннего трения [13, 76, 78].

Угол естественного откоса измеряли двумя способами: способом обрушения (способ определения статического угла естественного откоса) и способом насыпания (способ определения динамического угла естественного откоса) на экспериментальной установке представленной на рис. 2.6.

Способ обрушения заключается в следующем. Сыпучий продукт помещается в емкость прямоугольного типа, а затем убирается одна из боковых поверхностей. Вследствие этого происходит об-

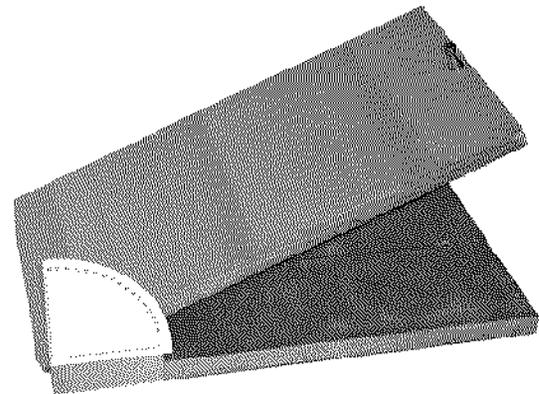


Рис. 2.6. - Установка для измерения угла естественного откоса

рушение массы сыпучего продукта, а угол, образованный склоном обрушившегося продукта и горизонталью является статическим углом естественного откоса.

Способ насыпания заключается в следующем. На ровную горизонтальную поверхность сверху высыпают продукт и измеряют угол между одним из склонов этого продукта и горизонталью. Полученный угол называется динамическим углом естественного откоса. Для получения более точного результата эксперимент проводили шесть раз, а как результат исследований вынесли среднее арифметическое значение. Расхождение между результатами отдельных измерений и их средней арифметической величиной не превышали допустимых 10 %. Результаты проведенных измерений представлены на рис. 2.7.

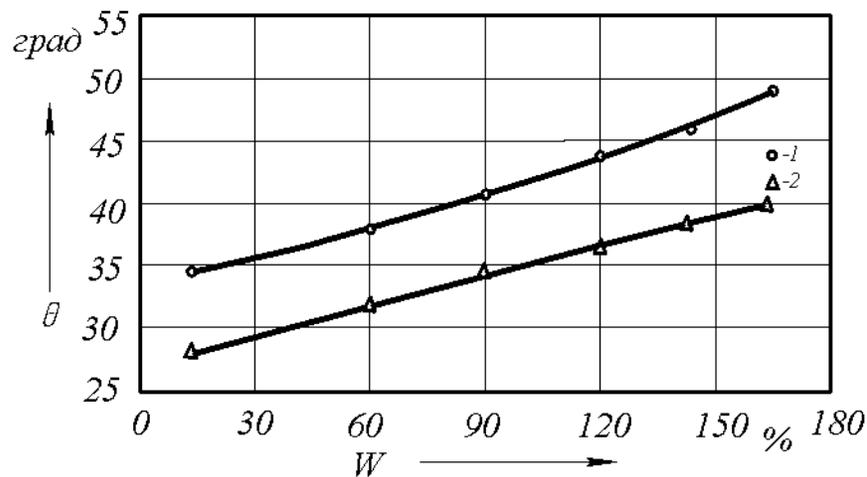


Рис. 2.7. - Влияние влажности на угол естественного откоса гречихи:
 1 – статического угла естественного откоса;
 2 – динамического угла естественного откоса.

Из графика видно, что на величину угла естественного откоса частиц гречихи наиболее влияние оказывает влажность и ее увеличением соответственно возрастает. Это объясняется действием молекулярных сил притяжения пленочной жидкости, находящейся на поверхности каждой частицы гречихи. Статический угол естественного откоса в зависимости от влажности W^c от 0 до 30 % изменялся в пределах от 42 до 61 градуса, а динамический – от 37 до 51 градуса.

Полученные результаты исследования физико-механических свойств гречихи были учтены при разработке оригинальной конструкции сушильной установки с активной гидродинамикой и пофракционной обработке полидисперсного материала [105, 145].

2.1.6. Гранулометрический состав гречихи

Гранулометрический анализ представляет собой статистическое исследование распределения частиц по размерам.

Реальные дисперсные смеси всегда полидисперсны, т.е. в элементарном объеме содержатся частицы разных размеров. Гречиха представляет собой также полидисперсную систему, в которой содержатся частицы различ-

ного размера (оболочки зерна, неосахаренный крахмал и другие нерастворимые вещества эндосперма), а также белок, сахара и продукты взаимодействия белка с дубильными веществами [30, 48].

Гранулометрический состав определяется различными методами. При определении фракционного состава методом распределения частиц по линейным размерам в качестве определяющего параметра используется эквивалентный диаметр, который принимался равным диаметру шара с объемом средней частицы [78, 84]:

$$d_s = \sqrt[3]{\frac{6V_m}{\pi}}, \quad (2.6)$$

где $V = G/n\rho_s$ – объем средней частицы, м³;

G, n – соответственно масса произвольной навески, кг и число частиц в этой навеске соответственно.

Наиболее распространенным является метод ситового анализа. Поэтому гранулометрический состав определяется методом рассева на ситах КСИ со стандартным набором сит. Размеры частиц полученных фракций ограничены размерами отверстий используемых в анализе сит (d_2-d_1).

За результат анализа принимали среднее арифметическое значение результатов двух параллельных определений.

Результаты дисперсионного анализа (гранулометрический состав дисперсного материала) могут быть представлены в виде таблиц или графически. Принимая равномерным распределение частиц по размерам внутри каждой фракции, можно построить ступенчатый график, называемый гистограммой. По оси абсцисс откладываются размеры частиц, а по оси ординат – относительные содержания фракций, т. е. процентное содержание каждой фракции, отнесенное к массе всего материала. Если процентное содержание каждой фракции разделить на разность размеров частиц, принятых в качестве граничных, и найденные значения отложить в системе координат, как ординаты точек, абсциссы которых равны среднему для соответствующих фракций размеру частиц, то через полученные точки можно провести плавную

дифференциальную кривую распределения частиц по размерам.

Результаты измерений представлены на рис. 2.8 в виде дифференциальной кривой плотности распределения частиц по размерам.



Рис. 2.8. - Дифференциальная кривая плотности распределения частиц по размерам

2.2. Исследование теплофизических характеристик гречихи

Для выполнения тепловых расчетов сушильных аппаратов необходимо знать тепловые характеристики (теплопроводность, температуропроводность, теплоемкость) высушиваемых материалов, от которых зависит выбор рационального метода и режима сушки материала. Так, решение вопроса о возможности применения для сушки конкретного продукта аппаратов с активными гидродинамическими режимами зависит не только от диффузионного сопротивления, определяемого внутренней пористой структурой материала, но и от его способности воспринимать необходимое для сушки количество тепла. Тепловые характеристики необходимо знать также при обработке результатов экспериментальных исследований процессов тепло – и массообмена, определении механизма переноса тепла во влажном материале, анализе форм и видов связи влаги с материалом и т. д. [64].

Теплофизические характеристики зерна гречихи сырья являются функ-

циями состояния и свойств вещества, зависящих от многих факторов, к которым следует отнести химический состав и структуру. При этом большое значение имеет характер изменения теплофизических характеристик от основных параметров влажного материала: температуры и влагосодержания.

В научной литературе разнятся данные по теплофизическим характеристикам зерна гречихи, поэтому существует необходимость в их уточнении.

Разработанные в настоящее время методы определения теплофизических характеристик влажных материалов подразделяются на две группы: стационарного и нестационарного потока теплоты. Методы стационарного потока теплоты основаны на постоянстве температурного поля, проходящего через исследуемый продукт на протяжении всего опыта [29]. Такие методы длительны и требуют очень строгого выполнения граничных условий. Методы нестационарного отличаются переменностью температурного режима в испытуемом образце при кратковременном тепловом воздействии на продукт в условиях малого температурного градиента [24, 25]. Основными преимуществами таких методов являются: незначительное влияние градиента температуры на гидродинамическое состояние продукта, простота, надежность и быстрота проведения эксперимента.

Исследования теплофизических характеристик гречихи проводили на экспериментальном стенде (рис.2.9) лаборатории кафедры МАПП ВГУИТ. На стенде имеется общий выключатель 1, промежуточный тумблер 2 для подачи напряжения на потенциометр 3, который включается двумя тумблерами, находящимися за дверкой потенциометра. На передней панели стенда закреплен эталон 6 с известными теплофизическими характеристиками, на который помещается образец пищевого продукта 8, а

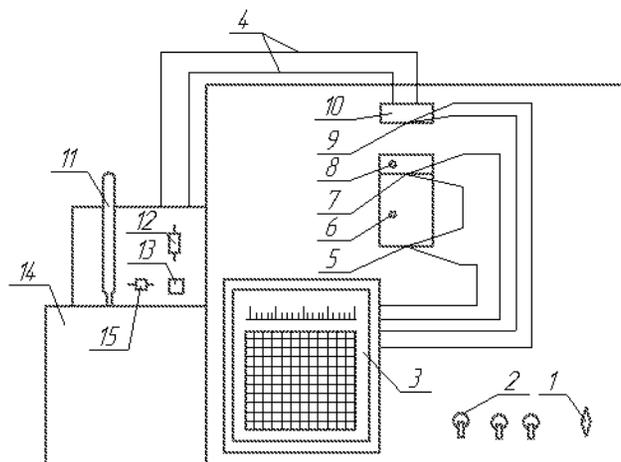


Рис 2.9 – Экспериментальный стенд

также установлена греющая поверхности 10 с возможностью перемещаться в вертикальном положении. Рядом со стендом установлен ультратермостат 14, обеспечивающий постоянную температуру греющей поверхности 10. Ультратермостат 14 включается вертикальным ползунком 12. Кнопкой 13 включается насос, подающий горячую воду к греющей поверхности. Вода нагревается ТЭНом, который управляется ползунком 15. Температура воды регулируется электроконтактный термометром 11, который автоматически поддерживает ее постоянное значение, что обеспечивает постоянный поток теплогреющей поверхности.

В греющей поверхности 10 установлена термопара 9, подключенная к потенциометру 3 и показывающая температуру; греющей поверхности. В плоскости соприкосновения пищевого продукта и эталона установлен шарик 7 дифференциальной термопары, второй шарик 5 этой термопары установлен на противоположном конце эталона, являющегося полуограниченным стержнем системы двух тел - эталон и ограниченным стержнем - пищевой продукт. Эта система образуется после присоединения греющей поверхности сверху к пищевому продукту.

При определении теплофизических характеристик использован метод нестационарного теплового режима, основанный на решении задачи теплопроводности для начальной стадии процесса, а именно метод двух температурно-временных точек, разработанный В.С. Волькенштейн [21,22].

Начальная стадия охватывает малые промежутки времени, характеризуемые числом Фурье $Fo \leq 0,55$ [74]. Эксперимент, основанный на теории этой стадии теплопроводности, является непродолжительным. При этом исключается влияние эффекта термовлагопроводности на исследуемые тепловые свойства. Задача сводится к совместному решению дифференциальных уравнений теплопроводности для одномерного потока:

для исследуемого материала:

$$\frac{\partial T_M(x, \tau)}{\partial \tau} = \alpha_M \frac{\partial^2 T_M(x, \tau)}{\partial x^2} \quad (0 < x < h); \quad (2.7)$$

для эталона:

$$\frac{\partial T_{\text{Э}}(x, \tau)}{\partial \tau} = \alpha_{\text{Э}} \frac{\partial^2 T_{\text{Э}}(x, \tau)}{\partial x^2} \quad (h < x < \infty); \quad (2.8)$$

где x – текущая координата;

h – высота слоя исследуемого материала;

τ – любой момент времени;

T_M – температура исследуемого материала, К;

$T_{\text{Э}}$ – температура эталона, К.

Начальные и граничные условия этой задачи выражаются следующей системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} T_M(x, 0) &= T_{\text{Э}}(x, 0) = T_0 \\ T_M(h, \tau) &= T_{\text{Э}}(h, \tau) \\ \lambda_M \frac{\partial T_M(h, \tau)}{\partial x} &= \lambda_{\text{Э}} \frac{\partial T_{\text{Э}}(h, \tau)}{\partial x} \\ T_M(0, \tau) &= T_H = \text{const} \\ T_{\text{Э}}(\infty, \tau) &= T_0 \end{aligned} \right\}; \quad (2.9)$$

где T_H – температура нагревателя, К;

T_0 – температура исследуемого образца и эталона в начальный момент времени, К.

Для температуры T в месте стыка образца и эталона (когда $x = h$) решение уравнений (2.7), (2.8) учетом (2.9) дается в виде бесконечного ряда:

$$\frac{T}{T_H} = (1 + \alpha) \cdot [\text{erfc}(y) - \alpha \cdot \text{erfc}(3y) + \dots]; \quad (2.10)$$

где:

$$\alpha = \frac{\lambda_M \cdot \sqrt{\alpha_{\text{Э}}} - \lambda_{\text{Э}} \cdot \sqrt{\alpha_M}}{\lambda_M \cdot \sqrt{\alpha_{\text{Э}}} + \lambda_{\text{Э}} \cdot \sqrt{\alpha_M}}; \quad y = \frac{h}{2\sqrt{\alpha \cdot \tau}}$$

$$\text{erfc}(y) = 1 - \text{erf}(y)$$

$$\operatorname{erf}(y) = \frac{2}{\pi} \int_0^y e^{-y^2} \cdot dy - \text{интеграл вероятности Гаусса.}$$

Для малых значений τ решение уравнения (2.10.) ограничивается первым членом ряда. В этом случае решение имеет вид:

$$\frac{T}{T_H} = (1 + \alpha) \cdot [1 - \operatorname{erfc}(y)]; \quad (2.11)$$

Решая уравнения (2.7) и (2.8) с учетом (2.9), можно определить α , λ и c для исследуемого продукта:

$$\alpha_M = \frac{h^2}{4y_1^2 \tau_1}; \quad (2.12)$$

$$\lambda_M = b \cdot \varepsilon \sqrt{\alpha_M}; \quad (2.13)$$

$$c_M = \frac{\lambda_M}{\alpha_M \cdot \rho_M}; \quad (2.14)$$

где y и ε – некоторые безразмерные величины, которые определяются по таблицам, исходя из найденных опытных соотношений τ_2/τ_1 ;

τ_1 – время, в течение которого температура на границе соприкосновения эталонного тела исследуемого образца достигнет $\Delta T_1 = k_1 \cdot \Delta T$,

τ_2 – время, в течение которого эта температура достигнет $\Delta T_2 = k_2 \cdot \Delta T$;

k_1 и k_2 – заранее заданные значения, равные 0,75 и 0,5;

ΔT – разность между температурой нагревателя T_H и температурой в месте стыка исследуемого продукта и эталона T , т. е.

$\Delta T = T_H - T$; ρ_M – плотность исследуемого продукта, кг/м³.

При проведении исследований начальная температура продукта и эталона в течение всего опыта поддерживались постоянной. Эталон 6 сечением 70×70 мм и длиной 150 мм изготовлен из органического стекла и имеет следующие характеристики: $\alpha_s = 15,7$ м²/с, $\lambda_s = 0,1839$ Вт/м·К, $c_s = 10,88$ Дж/кг·К, $\rho_s = 1075$

кг/м³.

В ходе эксперимента фиксируется время τ_1 и τ_2 , в течение которого температура на границе раздела эталонного тела и исследуемого образца достигнет заданного значения ΔT_1 и ΔT_2 соответственно.

Данный метод заключается в исследовании ограниченного (пищевой продукт) и полуограниченного (эталон) тел, которые приводятся в соприкосновение по одной общей плоскости. Нагреватель, нагретый до постоянной температуры, приведен в соприкосновение с продуктом и передает постоянный поток теплоты, который проходит через толщину пищевого продукта с различной скоростью. В результате температура в плоскости соприкосновения пищевого продукта с эталоном изменяется и записывается на диаграмме потенциометра в виде кривой, по которой можно определить время и изменение температуры.

Температуропроводность и теплопроводность определяются по эмпирическим формулам, полученным из решения системы дифференциальных уравнений, составленных для данной системы двух тел, в одно из которых входят неизвестные теплофизические характеристики. Относительно этих характеристик решается система уравнений, включающая параметры проведенного опыта. Так как исследуемые два тела соприкасаются по одной общей плоскости, то по принципам математической физики можно составить два дифференциальных уравнения с едиными начальными и граничными условиями первого рода, обусловленных параметрами проводимого опыта.

Теплопроводность (Вт/(м·К)) исследуемых образцов зерна гречихи определяется по эмпирической формуле

$$\lambda_m = \lambda_s \frac{1-h}{1+h} \sqrt{\frac{a_m}{a_s}}, \quad (2.15)$$

где λ_m , a_m – соответственно теплопроводность и температуропроводность образца исследуемого пищевого продукта; $\lambda_s = 0,184$ Вт/(м·К), $a_s = 15,7 \cdot 10^{-8}$

m^2/c – соответственно теплопроводность и температуропроводность эталона;
 h – вспомогательная величина, определяемая по формуле:

$$h = \frac{t''}{t_{\text{сп}} [1 - \Phi(z'')] } - 1, \quad (2.16)$$

где t'' – температура в плоскости соприкосновения образца продукта и эталона, определяемая по полученной диаграмме, °С; $t_{\text{сп}}$ – температура греющей поверхности, определяемая по полученной диаграмме аналогично, °С; $\Phi(z'')$ – функция Гаусса.

Удельная теплоемкость пищевого продукта (Дж/(кг·К)) определяется по зависимости:

$$c_m = \lambda_m / (a_m \rho_m), \quad (2.17)$$

где ρ_m – плотность зерна гречихи, кг/м³.

Значения коэффициентов температуропроводности, теплопроводности и удельной теплоемкости в интервале температур 293...393 К для образцов зерна гречихи влажностью 10...150 % приведены в приложении. Относительные погрешности определения α и λ не превышали 1 %. Результаты обработки экспериментов представлены на рис. 2.10.-2.15.

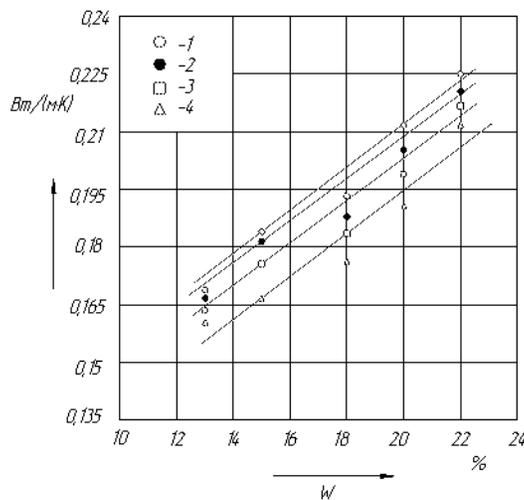


Рис.2.10- Зависимость коэффициента теплопроводности λ , Вт/(м·К), от влажности при:
 1 – T=353 К; 2 – T=333 К; 3 – T=313 К; 4 – T=293 К.

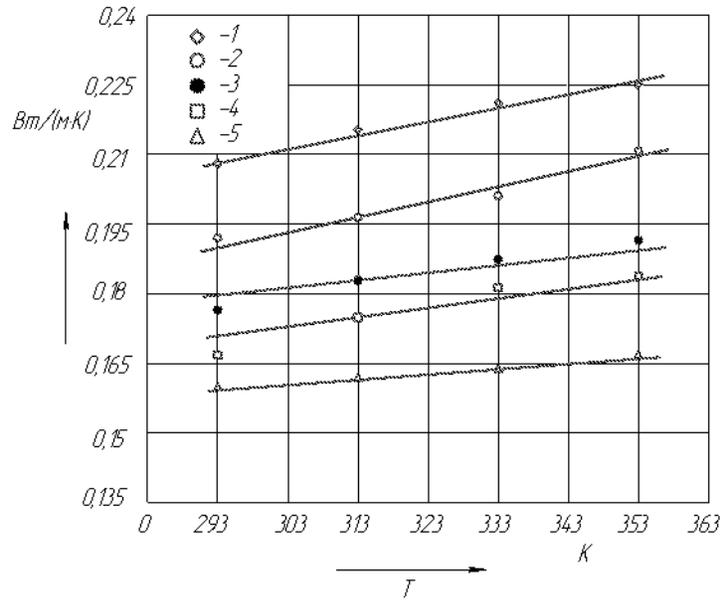


Рис.2.11. Зависимость коэффициента теплопроводности λ , Вт/(м·К), от температуры при:
 1 – W=22 %; 2 – W=20 %; 3 – W=18 %; 4 – W=15 %; 5 – W=13 %.

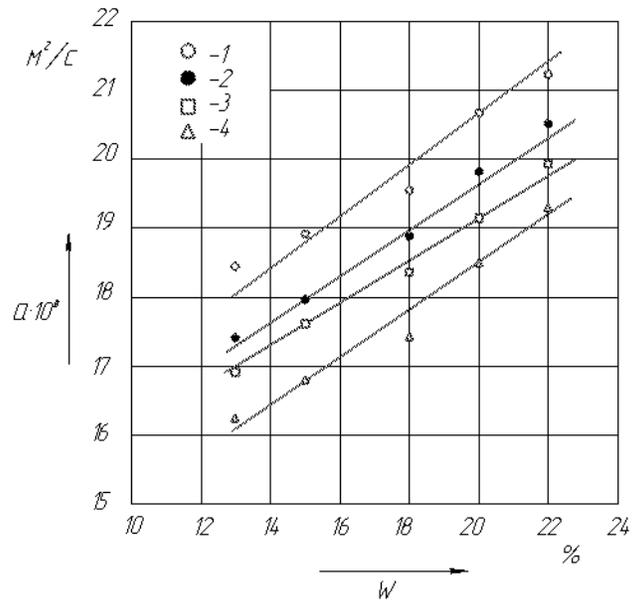


Рис.2.12 Зависимость коэффициента температуропроводности $\alpha \cdot 10^8$, м²/с, от влажности при:
 1 – T=353 К; 2 – T=333 К; 3 – T=313 К; 4 – T=293 К.

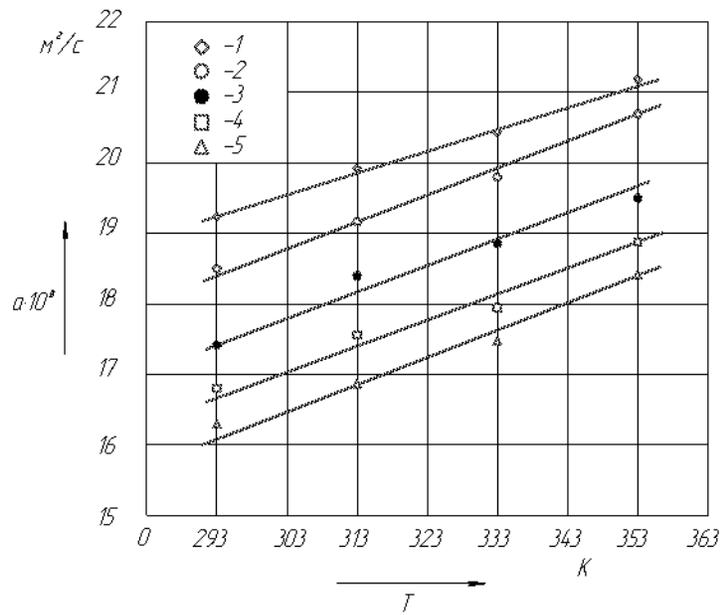


Рис.2.13 Зависимость коэффициента температуропроводности $\alpha \cdot 10^8, \text{ м}^2/\text{с}$, от температуры при:
 1 – W=22 %; 2 – W=20 %; 3 – W=18 %; 4 – W=15 %; 5 – W=13 %.

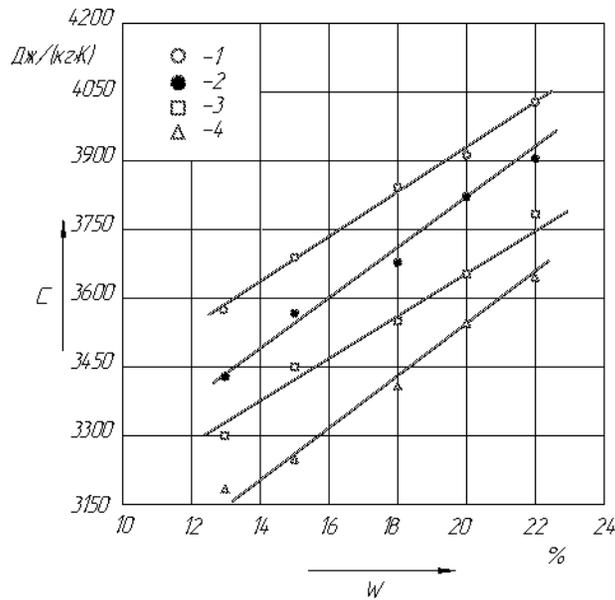


Рис.2.14. Зависимость коэффициента удельной теплоемкости $c, \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$, от влажности при:
 1 – T=353 К; 2 – T=333 К; 3 – T=313 К; 4 – T=293 К.

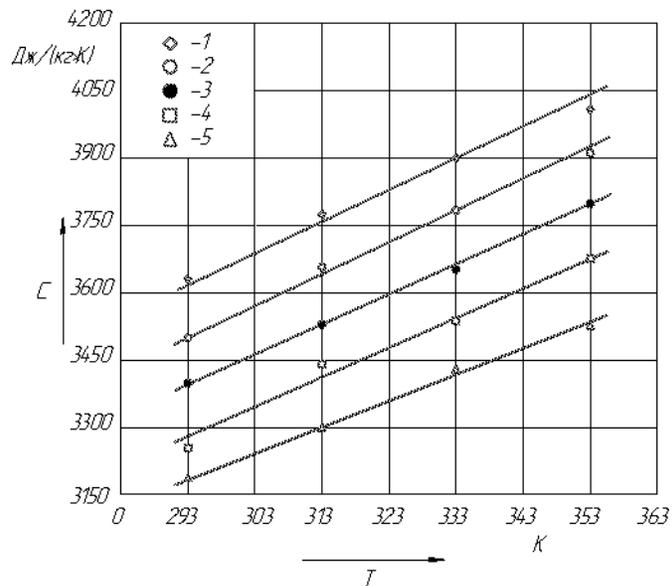


Рис.2.15. Зависимость коэффициента удельной теплоемкости c , Дж/(кг·К), от температуры при:
 1 – $W=22\%$; 2 – $W=20\%$; 3 – $W=18\%$; 4 – $W=15\%$; 5 – $W=13\%$.

Из графиков видно, что при увеличении температуры, коэффициент температуропроводности a ; коэффициент теплопроводности λ и удельная теплоемкость c монотонно возрастают.

2.3. Исследование гигротермических свойств гречихи

Сушка гречихи является одной из важнейших стадий подготовки данного сырья к последующему процессу его переработки. От режима сушки зависят пищевая ценность и качественные показатели готовой продукции, являющиеся результатом структурно-механических, биологических и физико-механических преобразований веществ. Технологические режимы сушки зерна гречихи зависят от содержания в них воды и оказывают существенное влияние на изменение углеводов, денатурацию белка, окисления липидов, изменения витаминов и органических кислот. Для качественной реализации процесса необходимо изучить характер связи влаги с определением участков, на которых осуществляется преобразование веществ при повышении темпе-

ратуры. Это может существенно облегчить задачу выбора рациональных режимов сушки.

2.3.1. Дифференциально-термический анализ

Исследование закономерностей теплового воздействия на гречиху осуществляли методом термического анализа [1, 3] на комплексном термоанализаторе TGA-DSC фирмы Mettler-Toledo в атмосфере воздуха с постоянной скоростью нагрева 3К/мин до 1273 К.

Исследования осуществляли в алюминиевых тиглях с общей массой навески – 6,6578 мг. Применяемые для количественной обработки методом неизотермической кинетики термоаналитические кривые одновременно регистрируют изменения массы образца, скорости изменения температуры или энтальпии и изменения массы (кривые TGA, DTA и DTG).

В процессе теплового воздействия продукт претерпевает значительные физико-химические изменения, в результате которых высвобождается вода, содержащаяся в продукте и определяющая характер происходящих внутри него преобразований вещества. За счет испарения влаги и разложения сахаров, клетчатки и других органических соединений масса продукта снижается[2].

Количественную оценку форм связи влаги в продукте осуществляли по экспериментальным зависимостям изменения массы образца TGA, скорости изменения температуры DTA и скорости изменения массы DTG (рис. 1), полученным методом термогравиметрии.

В процессе нагрева наблюдается уменьшение массы образца (кривая TGA), связанное с потерей влаги. Зависимость скорости изменения температуры DTA характеризуется значительным эндотермическим эффектом с начала нагрева до температуры 443 К (табл. 1). Максимальная скорость влагоотделения достигается при температуре 383 К.

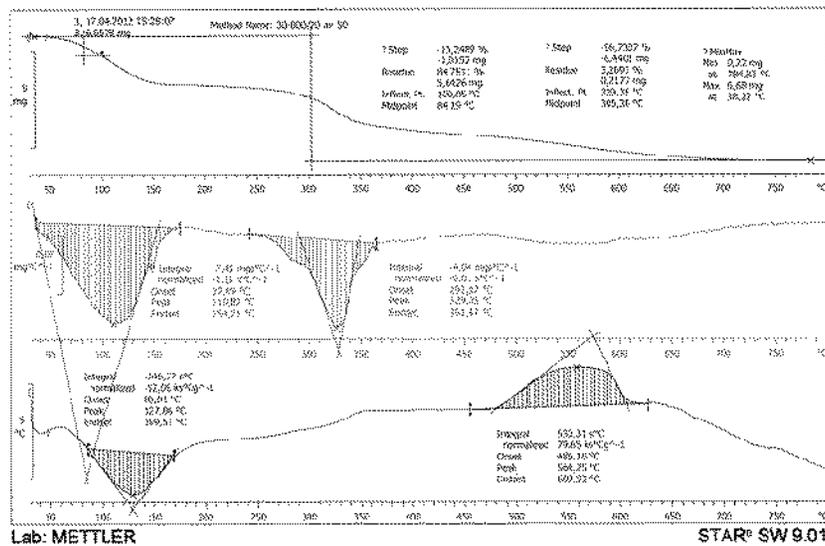


Рис.2.16. Экспериментальные зависимости изменения массы образца гречихи TGA, скорости изменения температуры DTA и скорости изменения массы DTG

Таблица 2.1

Кинетические температурные характеристики процесса нагрева зерна гречихи

Кинетические характеристики процесса	Значение параметра
Температура начала эндотермического процесса, К	360
Температура окончания эндотермического процесса, К	443

Полученная зависимость степени превращения вещества от температуры T (рис. 2.17) имеет вид, отражающий сложный характер взаимодействия воды и сухих веществ зерна гречихи, и предполагает разную скорость дегидратации.

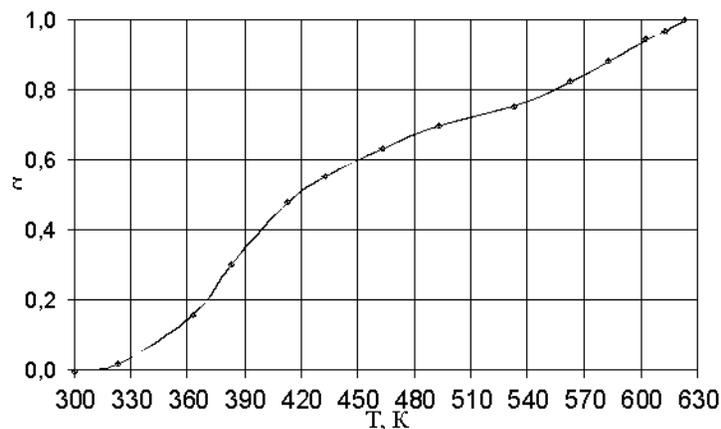


Рисунок 2.17 Зависимость степени превращения α вещества от температуры T исследуемых зерна гречихи при нагревании со скоростью подъема температуры 3 К/мин

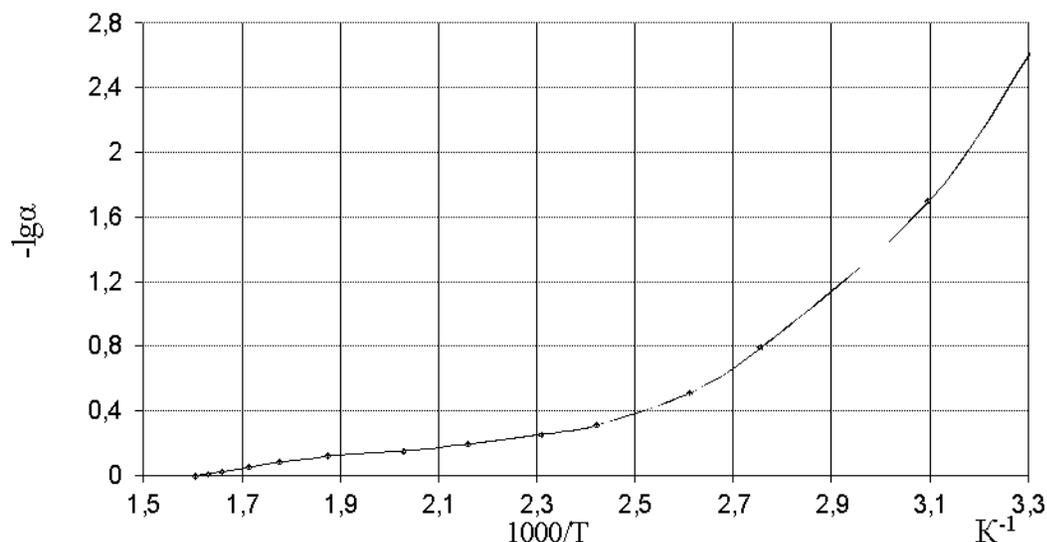


Рисунок 2.18 Зависимость $-lg\alpha$ от величины $1000/T$ исследуемых зерна гречихи при нагревании со скоростью подъема температуры 3 К/мин

При температуре 303...323 К (участок 1 рис. 2.18) происходит нагрев и удаление физико-механически связанной влаги (капиллярной влаги), имеющей невысокую энергию связи с продуктом. При температурах 323...382 К (участок 2 рис. 2.18) осуществляется десорбция осмотической влаги гречихи. Интервал 382...488 К (участок 3 рис. 2.18) характеризуется удалением адсорбционной влаги. При дальнейшем повышении температуры начинается удаление химически связанной влаги, но в процессе сушки оно не происходит, поскольку температура продукта не выходит за пределы рассмотренных интервалов.

На кривой отчетливо видно 4 линейных участка для исследуемого продукта, что свидетельствует о ступенчатом выделении воды или продуктов реакции.

Проведение термического анализа позволило выявить формы связи влаги в семенах гречихи и температурные интервалы их удаления, что позволит в дальнейшем разработать режимы сушки, позволяющие получить продукт высокого качества при минимальных энергозатратах.

2.3.2. Изучение изотерм сорбции - десорбции гречихи.

Для оценки движущей силы процесса сушки необходимо знать влагосодержание материала, соответствующее состоянию равновесия его с окружающей средой (теплоносителем), характеризующее относительной влажностью и температурой. Поэтому при рассмотрении свойств материала как объекта сушки большое значение имеет анализ кривых изотерм сорбции-десорбции. По этим изотермам определяют потенциальную возможность воздуха как теплоносителя и, кроме того, соответствует ли остаточная влажность равновесной. Одновременно с этим можно оценить не геометрические размеры реальных пор в материале, а особенности строения материала как объекта сушки с учетом видов связи влаги с материалом и влияние изменения пористой структуры на механизм массопереноса [92].

Для определения равновесной влажности гречихи нами был использован графический метод определения равновесной влажности зерновой массы по М.Г. Голику и А.С. Панич [99].

Принцип метода состоит в ускоренном нахождении равновесной влажности зерна по изменению количества влаги в процессе сорбции или десорбции. Для реализации метода были подготовлены две навески исследуемых зерна гречихи с одинаковой влажностью и массой 15... 18 г (взвешивание проводили на аналитических весах). Навески помещались в эксикаторы с растворами серной кислоты различной концентрации, обеспечивающими относительную влажность воздуха 20, 40, 60, 80 %.

Влажность зерна до опыта определяли на влагомере FD -610 (рис. 2.27) по ГОСТ 3040 - 55.

Эксикаторы с навесками семян термостатировали в течение 5 ч. Затем навески вынимали из эксикаторов и взвешивали. Если влажность исследуемых семян не соответствовала равновесной влажности для данной относительной влажности воздуха, то за время пребывания в эксикаторах семена подсыхали или увлажнялись, а, следовательно, изменялась масса навесок

(привес или убыль). По результатам взвешивания строили график, по оси ординат которого откладываются значения изменения массы семян, по оси абсцисс - относительной влажности воздуха. Точки изменения массы навесок семян должны укладываться на прямую линию. Пересечение этой прямой с осью абсцисс дает точку гигроскопического равновесия, т. е. ту относительную влажность воздуха, которой соответствует данная влажность семян.

Полученные зависимости равновесной влажности зерна гречихи от относительной влажности воздуха представлены на рис. 2.28.

Как видно из графиков на рис. 2.19, полученные изотермы десорбции зерна гречихи имеют вид, характерный для изотерм капиллярно-пористых коллоидных тел. Изотермы представляют собой S-образные плавные кривые без наличия сингулярных точек, что указывает на отсутствие резко выраженных переходов между отдельными стадиями связывания влаги с материалом.

Применяя при исследовании изотерм десорбции метод А.В. Лыкова [63], можно дать качественную оценку формам связи влаги с гречихой. Форма кривой изотермы десорбции свидетельствует о том, что на участке кривой ($p = 0...30\%$ изотерма обращена выпуклостью к оси абсцисс, что соответствует мономолекулярно - адсорбционной влаге, энергия связи которой велика.

В интервале относительной влажности, от 30 до 80 % кривая изотермы обращена выпуклостью к оси ординат, что соответствует полимолекулярно - адсорбционной влаге, энергия связи которой значительно меньше, чем в первом случае.

Влияние температуры на равновесную влажность на протяжении всей изотермы объясняется тем, что с увеличением температуры энергия связи влаги с материалом уменьшается.

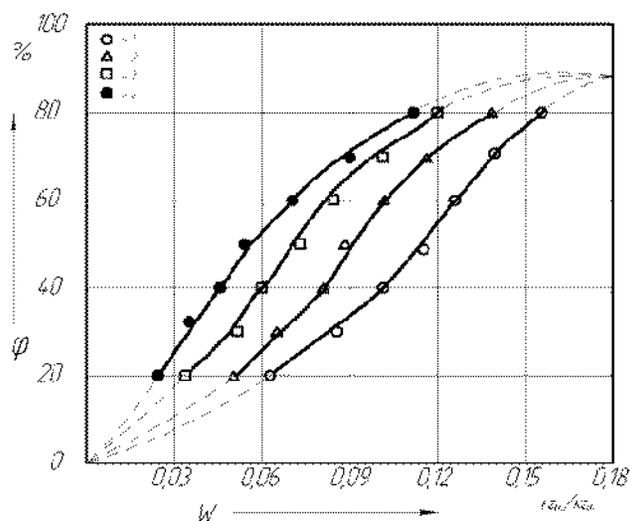


Рис. 2.19 - Зависимости равновесной влажности гречихи от относительной влажности воздуха при температуре окружающего воздуха:
 1 - $T=293$ К; 2 - $T=313$ К; 3 - $T=333$ К; 4 - $T=353$ К

Из анализа форм связей влаги видно, что основная часть влаги в гречихе, которая удаляется при сушке ($W_K = 0,065 \dots 0,085$ кг_{вл}/кг_{св}), является осмотически связанной и капиллярной.

Полученные экспериментальные данные равновесной влажности гречихи имеют большое значение для технологии процесса сушки. Очевидно, если материал после сушки хранится в обычных условиях (например, на складах, где имеет место взаимодействие материала с влажным воздухом), то конечное влагосодержание высушенного материала не должно быть меньше равновесного для условий хранения. Иначе при хранении материал будет поглощать влагу из воздуха путем сорбции вплоть до равновесного влагосодержания. Таким образом, изотермы десорбции могут служить для определения конечного влагосодержания материала при сушке в соответствии с условиями хранения.

ГЛАВА 3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ ГРЕЧИХИ В АППАРАТЕ С ЗАКРУЧЕННЫМ ПОТОКОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

3.1. Постановка задачи

Рассматривается процесс сушки частицы гречихи в сушилке с закрученным потоком теплоносителя, принципиальная схема представлена на рис. 3.1.

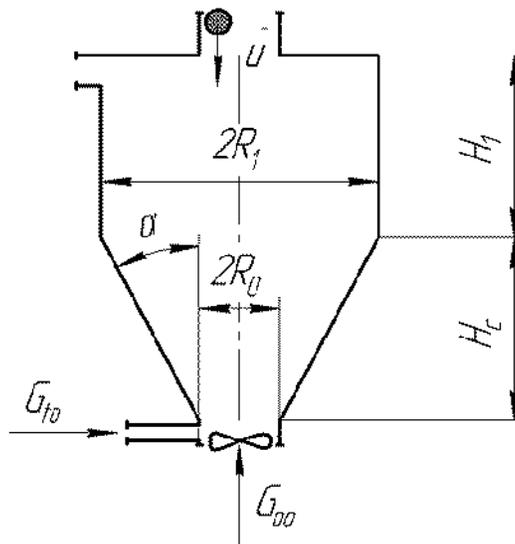


Рис. 3.1 принципиальная схема сушилки гречихи

Влажные частицы гречихи подаются в вихревую камеру через верхний осевой патрубок. Подогретый воздух подается в нижней части в виде осевого потока с расходом G_{oo} и угловой скоростью Ω_{oo} тангенциальным потоком с расходом G_{to} . Тангенциальные потоки обеспечивают закручивание воздушного потока в сушильной камере, что позволяет реализовать высокоинтенсивный процесс сушки частицы

$$G_{soz} = G_{oo} + G_{to} \quad (3.1)$$

Высушенные частицы гречихи выводятся через верхний тангенциальный штуцер.

3.2. Движение воздуха в сушильной камере

Полагаем, что на малом входном участке формируется вращательно движение воздушного потока с угловой скоростью Ω и осевой скоростью U_o

Предварительные оценки показывают, что момент сил трения воздушно-го потока о стенки камеры мал и не оказывает существенного влияния момент качества движения воздуха, который можно считать постоянным по высоте камеры.

Определим угловую скорость вращения воздушного потока около входного нижнего сечения

Скорости воздуха во входных патрубках

$$U_{oo} = \frac{G_{oo}}{\pi \cdot R_o^2 \cdot \rho_{воз}} \quad (3.2)$$

$$U_{to} = \frac{G_{to}}{\pi \cdot R_t^2 \cdot \rho_{воз}} \quad (3.3)$$

Где: G_{oo} , G_{to} - массовые расходы в осевом и тангенциальных патрубках, соответственно;

R_o, R_t - радиусы осевого и тангенциальных патрубков.

Осевая скорость воздуха в нижнем сечении аппарата

$$U_{zo} = U_{oo} + U_{to} \cdot \left(\frac{R_t}{R_o} \right)^2 \quad (3.4)$$

Угловую скорость воздуха в нижнем найдем из условия сохранения момента количества движения:

$$J_{oo} \cdot \Omega_{oo} + G_{to} \cdot U_{to} \cdot R_o = J_o \cdot \Omega_o \quad (3.5)$$

Где: J_o - момент инерции воздушного вращающегося потока массой $G_{воз}$

$J_{oo} = \frac{1}{2} G_{oo} R_o^2$ - момент инерции осевого потока

Ω_{oo} – угловая начальная скорость осевого потока G_{oo}

$$J_o = \frac{1}{2} G_{oo} R_0^2 \quad (3.6)$$

Принимая во внимание, что

$$G_{to} = \pi R_t^2 U_{to} \rho_{oo} \quad (3.7)$$

$$G_{zo} = \pi R_0^2 U_{zo} \rho_{oo} \quad (3.8)$$

Из уравнения (3.5) (3.1) с учетом (4.6÷4.8) получим

$$\Omega_o = 4 \frac{U_{to}^2 R_t^2}{U_{zo} R_o^3} + \Omega_{oo} \frac{G_{oo}}{G_{oo}} \quad (3.9)$$

Запишем условие постоянства момента количества движения воздуха по высоте камеры

$$J_o \Omega_o = J \Omega \quad (3.10)$$

$$\Omega = \Omega_o \frac{J_o}{J} \quad (3.11)$$

Или с учетом (3.6):

$$\Omega = \Omega_o \left(\frac{R_o}{R} \right)^2 \quad (3.12)$$

Где R – текущий радиус камеры

Из выражения (3.12) следует, что угловая скорость воздуха Ω уменьшается по осевой координате Z в конической камере и остается постоянной в цилиндрической части

$$U_z = U_{zo} \left[\frac{R_0}{R_{(z)}} \right]^2 \quad (3.13)$$

$$U_r = \begin{cases} U_z \cdot \operatorname{tg} \gamma & \text{при } Z < H \\ 0 & \text{при } H_1 < Z < H_1 + H_2 \end{cases} \quad (3.14)$$

$$U_\theta = \Omega r \quad (3.15)$$

Где $\gamma = \operatorname{arctg} \frac{R_1 R_0}{H_1}$ – угол наклона образующей корпуса в нижней кони-

ческой части сушильной камеры

r – текущий радиус

Модуль вектора скорости воздуха в произвольной точке определяется соотношением

$$U = \sqrt{U_r^2 + U_z^2 + U_\theta^2} \quad (3.16)$$

3.3. Движение частицы в сушильной камере

Рассмотрим движение частицы гречихи в цилиндрической системе координат: r, Z, θ .

Основными силами, определяющими характер движения частицы являются силы тяжести G и аэродинамическое сопротивление F_v [1.2]

Поскольку выбранная система координат, является неинерциальной, к реально действующим силам, в соответствии с принципом Даламбера, необходимо добавить центробежную силу инерции F_y [3]

$$F_y = \frac{m_y \cdot v_\theta^2}{r_y} \quad (3.17)$$

Где: m_y - масса частицы,

r_y - радиус частицы

$$m_y = \frac{1}{6} \pi \cdot d_y^3 \cdot \rho_y \quad (3.18)$$

Дифференциальные уравнения динамики частицы имеют вид

$$m_y \cdot \frac{d\vec{u}}{d\tau} = \vec{G} + \vec{F}_v + \vec{F}_y \quad (3.19)$$

В проекциях на координатные оси r, z, θ оно имеет вид

$$m_y \frac{du_r}{d\tau} = \frac{1}{2} C_D \cdot (U_r - u_r) \cdot \rho_{воз} \cdot U_{отн} \cdot S_M + \frac{m_y \cdot u_\theta^2}{r_y} \quad (3.20)$$

$$m_y \frac{du_\theta}{d\tau} = \frac{1}{2} C_D \cdot (U_\theta - u_\theta) \cdot \rho_{воз} \cdot U_{отн} \cdot S_M \quad (3.21)$$

$$m_{\text{ч}} \frac{du_z}{d\tau} = \frac{1}{2} C_D \cdot (U_z - u_z) \cdot \rho_{\text{воз}} \cdot U_{\text{отн}} \cdot S_M - m_{\text{ч}} g \quad (3.22)$$

Где: C_D - коэффициент аэродинамического сопротивления частицы

$U_{\text{отн}}$ - скорость теплоносителя относительно частицы

S_M - площадь миделева сечения частицы.

Величина C_D может быть найдена из выражения [1]

$$C_D = 0,4 + \frac{24}{\text{Re}} + \frac{4}{\text{Re}^{0,5}} \quad (3.23)$$

$\text{Re} = U_{\text{отн}} \cdot d_{\text{ч}} / \nu_{\text{возд}}$ - число Рейнольдса

Скорость теплоносителя относительно частицы можно представить в виде

$$U_{\text{отн}} = \sqrt{(U_z - u_z)^2 + (U_r - u_r)^2 + (U_{\theta} - u_{\theta})^2} \quad (3.24)$$

$$S_M = \frac{\pi d_{\text{ч}}^2}{4} \quad (3.25)$$

Координаты частицы в произвольный момент времени определяются из соотношений:

$$\frac{dZ_{\text{ч}}}{d\tau} = u_z \quad (3.26)$$

$$\frac{dZ_{\text{ч}}}{d\tau} = u_{\text{ч}} \quad (3.27)$$

$$\frac{d\theta_{\text{ч}}}{d\tau} = u_{\theta} \quad (3.28)$$

В начальных условиях задаются координаты $r_{\text{чн}}, Z_{\text{чн}}, \theta_{\text{чн}}$ и скорости $u_{r\text{ч}}, u_{z\text{ч}}, u_{\theta\text{ч}}$ при $\tau = 0$

Граничные условия на оси записываются из условия симметрии

$$\left. \frac{du_r}{dr} \right|_{r=0} = 0 \quad (3.29)$$

$$\left. \frac{du_z}{dr} \right|_{r=0} = 0 \quad (3.30)$$

$$\left. \frac{du_\theta}{dr} \right|_{r=0} = 0 \quad (3.31)$$

На стенке аппарата граничные условия записываются из условия отражения падающей частицы

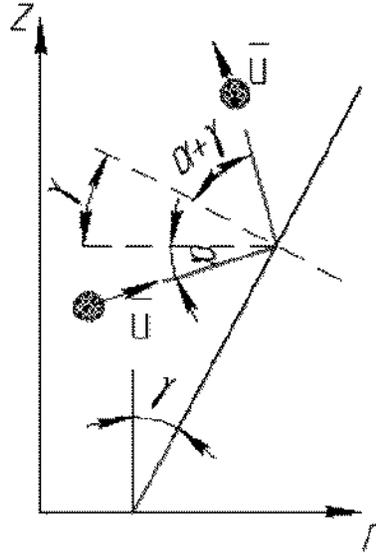


Рис. 3.2

$$\text{При } r_s = R \quad U_r = -\xi \sqrt{u_s^2 + u_z^2} \cdot \cos(\alpha + 2\gamma) \quad (3.32)$$

$$U_z = -\xi \sqrt{u_s^2 + u_z^2} \cdot \sin(\alpha + 2\gamma) \quad (3.33)$$

$$u_\theta = \xi \cdot u_\theta \quad (3.34)$$

Ввиду нелинейного характера полученной системы дифференциальных уравнений движения ее интегрирование осуществляется численно методом сеток

$$\bar{U}_{отн} = \frac{1}{\tau_1} \int_0^{\tau_1} u_{отн}(\tau) \cdot d\tau \quad (3.35)$$

3.4. Моделирование тепломассообмена в процессе сушки частицы

Полученное выражение (3.35) средней относительной скорости газа поз-

воляет вычислить коэффициенты тепломассоотдачи от поверхности частицы к воздуху [1]

$$\text{Nu} = 2 + 0,51 \text{Re}^{0,52} \text{Pr}^{0,33} \quad (3.36)$$

$$\text{Nu}_m = 2 + 0,51 \text{Re}^{0,52} \text{Sh}^{0,33} \quad (3.37)$$

Где $\text{Pr} = \nu_{\text{возд}} / \alpha_{\text{возд}}$ - число Прандтля для воздуха;

$\text{Sh} = \nu_{\text{возд}} / D$ - число Шмидта;

$\text{Nu} = \alpha d_v / \lambda_{\text{возд}}$ - число Нуссельта;

$\text{Nu}_m = \alpha_m d_v / D$ - число Нуссельта для массообмена;

$\alpha_{\text{возд}}$ - коэффициент теплопроводности воздуха

D - коэффициент диффузии водяного пара в воздухе

Дифференциальные уравнения процесса тепломассообмена в частице имеют вид [4]

$$\frac{dU_L}{d\tau} = A_{11} \left(\frac{d^2 U_L}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dU_L}{dr} \right) + A_{12} \left(\frac{d^2 t}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dt}{dr} \right) \quad (3.38)$$

$$\frac{dt}{d\tau} = A_{21} \left(\frac{d^2 U_L}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dU_L}{dr} \right) + A_{22} \left(\frac{d^2 t}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dt}{dr} \right) \quad (3.39)$$

Где $A_{11} = a_m$; $A_{12} = a_m \cdot \delta$; $A_{21} = \frac{r_L \cdot \varepsilon}{c_v} a_m$; $A_{22} = a_q + A_{21} \cdot \delta$

a_m - коэффициент диффузии влаги в материале;

δ - относительный коэффициент термодиффузии;

r_L - теплота конденсации пара;

$\varepsilon = a_{m1} / a_m$ - относительный коэффициент диффузии пара;

a_{m1} - коэффициент диффузии пара в материале;

a_q - коэффициент температуропроводности материала;

U_L - влагосодержание;

t - температура

В качестве начальных условий процесса тепломассообмена примем, что:

$$U_L(0, r) = U_{L_n} ; t(0, r) = t_n .$$

Тогда граничные условия для процесса тепломассобмена можно записать в виде::

$$\text{При } r = 0 \quad \frac{dU_L}{dr} = 0 \quad (3.40)$$

$$\frac{dt}{dr} = 0 \quad (3.41)$$

$$\text{При } r = \frac{d_v}{2} \quad \lambda_m = \frac{dU_L}{dr} = -\alpha_m (U_L - U_{L_{\text{воз}}}) ; \quad (3.42)$$

$$\lambda \frac{dt}{dr} = -\alpha (t - t_{\text{воз}}) , \quad (3.43)$$

где: λ_m - коэффициент массопроводности материала;

λ - коэффициент теплопроводности материала;

α_m , α - коэффициенты массо- и теплоотдачи.

Задача тепломассообмена при сушке гречихи также решалась численным методом сеток с использованием явной схемы.

3.5. Алгоритм численного моделирования процесса сушки частицы гречихи

3.5.1. Алгоритм численного моделирования процесса движения частицы в сушильной камере

Численное интегрирование дифференциальных уравнений (3.20)÷(3.22), (3.26) ÷ (3.27), (3.29) - выполним на дискретной сетке с постоянным шагом по времени $\Delta \tau$ методом Эйлера (с использованием явной схемы) [5]:

$$m_v \frac{u_{r,i+1} - u_{r,i}}{\Delta \tau} = \frac{1}{2} C_{D,i} (U_{r,i} - u_{r,i}) \rho \cdot U_{\text{отн},i} \cdot S_M + \frac{m_v \cdot u_{\theta,i}^2}{r_{v,i}} ; \quad (3.44)$$

$$m_v \frac{u_{\theta,i+1} - u_{\theta,i}}{\Delta \tau} = \frac{1}{2} C_{D,i} (U_{\theta,i} - u_{\theta,i}) \rho \cdot U_{\text{отн},i} \cdot S_M ; \quad (3.45)$$

$$m_{\psi} \frac{u_{z,i+1} - u_{z,i}}{\Delta \tau} = \frac{1}{2} C_{D,i} (U_{z,i} - u_{z,i}) \rho \cdot U_{отн,i} \cdot S_{\mathcal{M}} - m_{\psi} g; \quad (3.46)$$

$$\frac{Z_{\psi,i+1} - Z_{\psi,i}}{\Delta \tau} = u_{z,i} \quad (3.47)$$

$$\frac{r_{\psi,i+1} - r_{\psi,i}}{\Delta \tau} = u_{r,i} \quad (3.48)$$

Уравнения (3.44)÷ (3.48) позволяют рассчитать искомую величину на последующем шаге по времени, если известно ее значение на предыдущем шаге:

$$u_{r,i+1} = u_{r,i} + \Delta \tau \cdot \left[\frac{C_{D,i}}{2m_{\psi}} \cdot (U_{r,i} - u_{r,i}) \rho_{\text{воз}} U_{отн,i} S_{\mathcal{M}} + \frac{u_{\theta,i}^2}{r_{\psi,i}} \right] \quad (3.49)$$

$$u_{\theta,i+1} = u_{\theta,i} + \Delta \tau \cdot \left[\frac{C_{D,i}}{2m_{\psi}} \cdot (U_{\theta,i} - u_{\theta,i}) \rho_{\text{воз}} U_{отн,i} S_{\mathcal{M}} \right] \quad (3.50)$$

$$u_{z,i+1} = u_{z,i} + \Delta \tau \cdot \left[\frac{C_{D,i}}{2m_{\psi}} \cdot (U_{z,i} - u_{z,i}) \rho_{\text{воз}} U_{отн,i} S_{\mathcal{M}} - g \right] \quad (3.51)$$

$$z_{\psi,i+1} = z_{\psi,i} + u_{z,i} \cdot \Delta \tau \quad (3.52)$$

$$r_{\psi,i+1} = r_{\psi,i} + u_{r,i} \cdot \Delta \tau \quad (3.53)$$

Данный алгоритм реализован в форме программы в среде MathCAD 15.

Вычисления выполняются в следующей последовательности

Определим суммарный расход воздуха в сушилке

$$G_{\text{воз}} = G_{\text{oo}} + G_{\text{bo}} \quad (3.54)$$

Скорости воздуха во входных патрубках определим по формулам (3.2), (3.3)

Осевая скорость воздуха в нижнем сечении аппарата - (3.4) и в верхней (цилиндрической) части - (3.13)

Угловая скорость в нижнем сечении по (3.9).

Угол наклона образующей в конической части аппарата:

$$\gamma = \text{arctg} \frac{R_1 - R_0}{H_0} \quad (3.55)$$

Модули вектора скорости воздуха в нижнем сечении U_0 и верхней части аппарата U_1 - по (3.16).

Масса частицы и площадь её маделева сечения – по (3.18), (3.25)

Скорость витания частицы

$$v_{\text{вн}} = \sqrt{\frac{2gm_{\text{ч}}}{C_D S_M \rho_{\text{воз}}}} \quad (3.56)$$

В соответствии с ((3.49)÷(3.53)) рассчитываются значения проекций вектора скорости частицы u_r , u_{θ} , u_z и координат $r_{\text{ч}}$, $Z_{\text{ч}}$ на каждом шаге по времени τ

Определяются значения относительной скорости воздуха $U_{\text{отн}}$ по (3.24).

Вычисляется средняя относительная скорость воздуха $\bar{U}_{\text{отн}}$ по (3.35).

3.5.2. Алгоритм численного моделирования тепломассообмена при сушке частицы гречихи

Дискретные аналоги дифференциальных уравнений (3.38), (3.39) запишем на трехточечном шаблоне (рис. 5.1) с его явной схемы [5].

Рис. 5.1. Трехточечный шаблон для уравнений тепломассообмена

$$\begin{aligned} \frac{U_{L,j+1,k} - U_{L,j,k}}{\Delta \tau} = & A_{11} \left(\frac{U_{L,j+1,k} - 2U_{L,j,k} + U_{L,j,k-1}}{\Delta r^2} + \frac{2}{r_k} \frac{U_{L,j+1,k} - U_{L,j,k-1}}{2\Delta r} \right) + \\ & + A_{12} \left(\frac{t_{j,k+1} - 2t_{j,k} + t_{j,k-1}}{\Delta r^2} + \frac{2}{r_k} \frac{t_{j,k+1} - t_{j,k-1}}{2\Delta r} \right) \end{aligned} \quad (3.57)$$

$$\begin{aligned} \frac{t_{j+1,k} - t_{j,k}}{\Delta \tau} = & A_{21} \left(\frac{U_{L,j,k+1} - U_{L,j,k} + U_{L,j,k-1}}{\Delta r^2} + \frac{2}{r_k} \frac{U_{L,j,k+1} - U_{L,j,k-1}}{2\Delta r} \right) + \\ & + A_{22} \left(\frac{t_{j,k+1} - 2t_{j,k} + t_{j,k-1}}{\Delta r^2} + \frac{2}{r_k} \frac{t_{j,k+1} - t_{j,k-1}}{2\Delta r} \right) \end{aligned} \quad (3.58)$$

Отсюда легко получить выражения позволяющие вычислить значения U_L , t на последующем шаге $j+1$ по времени, если известны значения этих величин

$$U_{Lj+1,k} = U_{Lj,k} + \frac{A_{11} \cdot \Delta \tau}{\Delta r^2} \left[\left(1 + \frac{\Delta r}{r_k} \right) \cdot U_{Lj,k+1} - 2U_{Lj,k} + \left(1 - \frac{\Delta r}{r_k} \right) \cdot U_{Lj,k-1} \right] + \frac{A_{12} \cdot \Delta \tau}{\Delta r^2} \left[\left(1 + \frac{\Delta r}{r_k} \right) \cdot t_{j,k+1} - 2t_{j,k} + \left(1 - \frac{\Delta r}{r_k} \right) \cdot t_{j,k-1} \right] \quad (3.59)$$

$$t_{j+1,k} = t_{j,k} + \frac{A_{21} \cdot \Delta \tau}{\Delta r^2} \left[\left(1 + \frac{\Delta r}{r_k} \right) \cdot U_{Lj,k+1} - 2U_{Lj,k} + \left(1 - \frac{\Delta r}{r_k} \right) \cdot U_{Lj,k-1} \right] + \frac{A_{22} \cdot \Delta \tau}{\Delta r^2} \left[\left(1 + \frac{\Delta r}{r_k} \right) \cdot t_{j,k+1} - 2t_{j,k} + \left(1 - \frac{\Delta r}{r_k} \right) \cdot t_{j,k-1} \right] \quad (3.60)$$

Где $r_k = k \cdot \Delta r$ - текущий радиус частицы

Из граничных условий (3.42), (3.43) следуют выражения, позволяющие определить U_L , t на поверхности частицы

$$\lambda_m \frac{U_{Lj,k1} - U_{Lj,k-1}}{\Delta r} = -\lambda_m (U_{Lj,k1} - U_{Ls03}) \quad (3.61)$$

$$U_{Lj,k1} = \frac{U_{Lj,k1-1} + B_{im} U_{Ls03}}{1 + B_{im}} \quad (3.62)$$

Где $B_{im} = \frac{\alpha_m \cdot \Delta k}{\lambda_m}$ - число Био для массообмена

$$\lambda \frac{-t_{j,k1-1}}{\Delta r} = -\lambda (t_{j,k1} - t_{s03}) \quad (3.63)$$

$$t_{j,k1} = \frac{t_{j,k1-1} + B_i \cdot t_{s03}}{1 + B_i} \quad (3.64)$$

Где $B_i = \frac{\alpha \Delta r}{\lambda}$ - число Био

Из граничных условий для оси (при $r = 0$) следует

$$U_{Lj,0} = U_{Lj,1} \quad (3.65)$$

$$t_{j,0} = t_{j,1} \quad (3.66)$$

Моделирование процессов тепломассообмена осуществляется в следующей последовательности

По найденной в первой части программы средней относительной скорости $\bar{U}_{отн}$ определяются числа Нуссельта, коэффициенты тепломассоотдачи по формулам (3.36), (3.37).

В соответствии с начальными условиями присваиваются первоначальные значения массивам $U_{L,k}$ и t_k .

По формулам (3.63), (3.64) определяются значения U_L и t на поверхности частицы (при $k = k1$).

$$U_{Lj+1,k} = U_{Lj,k} + \frac{A_{11} \cdot \Delta \tau}{\Delta r^2} \left[\left(1 + \frac{\Delta r}{r_k} \right) \cdot U_{Lj,k+1} - 2U_{Lj,k} + \left(1 - \frac{\Delta r}{r_k} \right) \cdot U_{Lj,k-1} \right] +$$

По

$$+ \frac{A_{12} \cdot \Delta \tau}{\Delta r^2} \left[\left(1 + \frac{\Delta r}{r_k} \right) \cdot t_{j,k+1} - 2t_{j,k} + \left(1 - \frac{\Delta r}{r_k} \right) \cdot t_{j,k-1} \right]$$

(3.59), (3.60) рассчитываются величины U_L и t во всех внутренних узлах для последующего шага по времени τ .

Определяются значения U_L и t на оси по формулам (3.65), (3.66)

Процедура многократно повторяется до достижения требуемого времени τ

Текс программы в MathCAD 15 приведен в приложении

Анализ процесса сушки частицы гречи.

Ниже представлены результаты процесса моделирования процесса сушки частицы гречихи в вихревой сушилке при следующих значениях параметров:

$$R_0 = 0,03 \text{ м}; \quad R_i = 0,015 \text{ м}; \quad R_1 = 0,1 \text{ м}; \quad H_0 = 0,2 \text{ м}; \quad H_1 = 0,2 \text{ м};$$

$$G_{00} = 0,15 \text{ м/с}; \quad G_{i0} = 0,03 \text{ м/с}; \quad r_{чн} = 0,08 \text{ м}; \quad u_{rн} = u_{zн} = u_{\thetaн} = 0; \quad \Delta \tau = 0,0005 \text{ с};$$

$$\tau_1 = 1 \text{ с}; \quad d_y = 0,004 \text{ м}; \quad \rho_y = 1240 \text{ кг/м}^3; \quad \lambda_y = 0,323 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}; \quad \xi = 0,95;$$

$$t_{чн} = 20 \text{ }^\circ\text{C}; \quad t_{\text{воз}} = 60 \text{ }^\circ\text{C}; \quad \rho_{\text{воз}} = 1,06 \text{ кг/м}^3; \quad \nu_{\text{воз}} = 1,9 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}; \quad \pi;$$

$$\lambda_{\text{воз}} = 0,029 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}; \quad pC_{\text{воз}} = 1005 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}; \quad U_{L\text{воз}} = 0,05 \text{ кг/кг};$$

$$\lambda_m = 10^{-7} \text{ кг/м} \cdot \text{с}; \quad a_m = 8,5 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}; \quad \delta = 0,006 \text{ 1/К}; \quad \varepsilon = 0,01 \text{ 1/К};$$

$$\alpha_q = 1,1 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}; \quad \tau_i = 90 \text{ с}; \quad \Delta \tau_i = 0,05 \text{ с}; \quad K1 = 20; \quad r_p = 2,4 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг};$$

$$U_{LH} = 0,3$$

На рис. 6,1÷6,4 представлены распределения проекций вектора скорости воздуха в вихревой сушилке. Осевая скорость U_z , угловая Ω и тангенциальная скорость воздуха U_θ уменьшаются по высоте конической части сушилки и остаются постоянными в ее цилиндрической части.

Зависимость координат r и z частицы, а также ее траектория в $r-z$ координатах представлена на рис. 6,5÷6,6.

Проекции вектора скорости частицы u_r, u_z, u_θ монотонно изменяются в интервале между двумя ударами о стенку камеры. В момент удара о стенку скорость u_r меняет свое значение на противоположное, а скорость u_z, u_θ сохраняют свое направление.

Зависимость проекций вектора скорости частицы от времени представлена на рис. 6.7

На рис. 6.8, 6.9 представлены распределения влагосодержания U_L и температуры t частицы для времени сушки 5 и 90 с, соответственно. Из них следует что при $\tau = 90 \text{ с}$ среднее по частице влагосодержание равно 0.1, т.е. процесс сушки можно считать законченным.

Разработанная математическая модель и программа позволяют проанализировать влияние различных параметров на процесс сушки частицы. В частности, радиальная координата, при которой частица вводится в камеру $r_{\text{ин}}$ слабо влияет на среднюю относительную скорость газа $\bar{U}_{\text{отн}}$ и α (рис. 6.11).

Выполненная оценка влияния радиуса нижнего штуцера для подачи воздуха R_0 на эти же параметры выявлено $R_0 = 0,067 \text{ м}$ ($R_0/R_1 = 2/3$) (рис. 6.12).

Другим важным технологическим моментом, определяющим эффектив-

ность работы сушилки является правильное распределение воздушного потока между осевым и тангенциальными вводами. Так, при общем расходе воздуха $G_{\text{воз}} = 0,21 \text{ кг/с}$, наблюдается экстремум при $G_{\text{ос}} = 0,165 \text{ кг/с}$ и $G_{\text{то}} = 0,045 \text{ кг/с}$.

Аналогично может оцениваться влияние остальных параметров на эффективность процесса сушки.

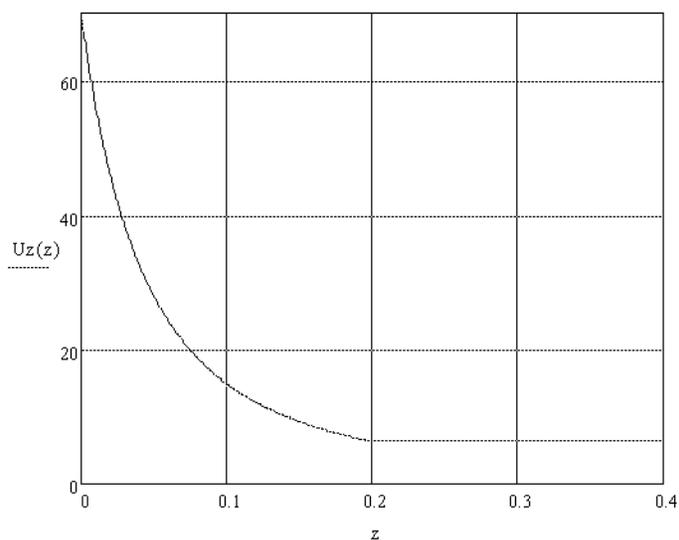


Рис. 3.4. Распределение осевой скорости воздуха по высоте сушилки

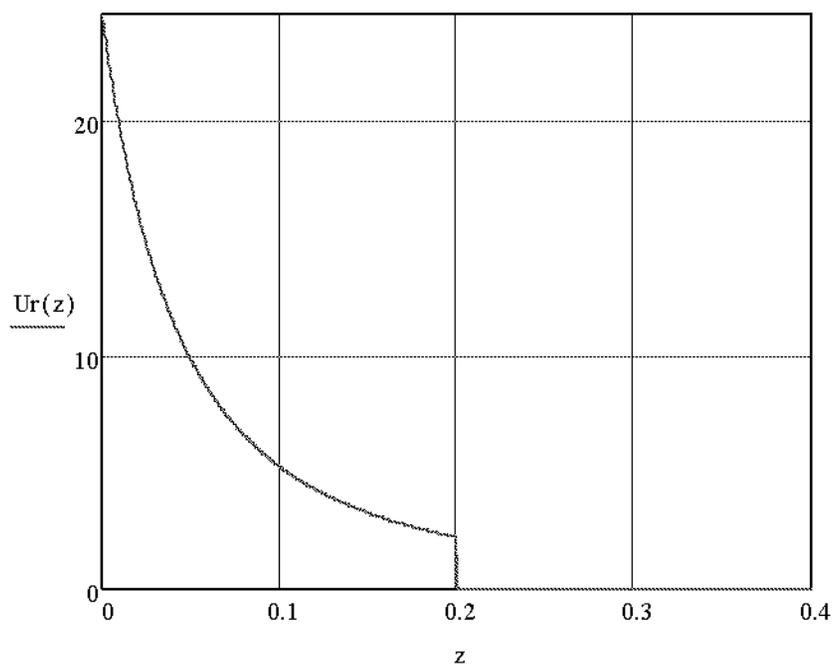


Рис. 3.5. Распределение радиальной скорости воздуха по высоте сушилки

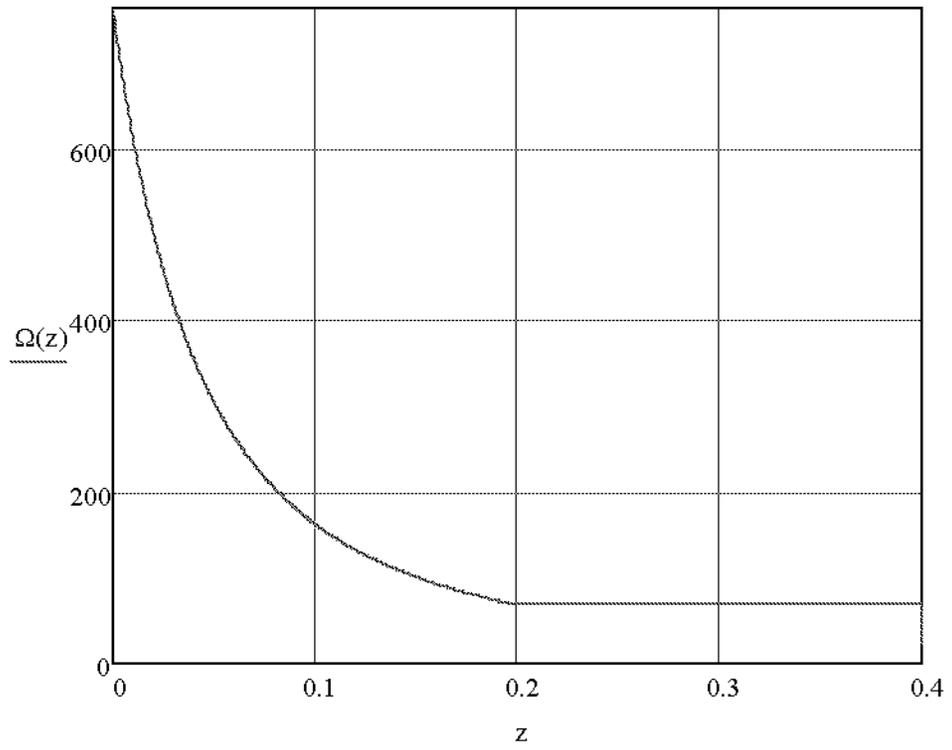


Рис. 3.6. Распределение угловой скорости воздуха по высоте сушилки

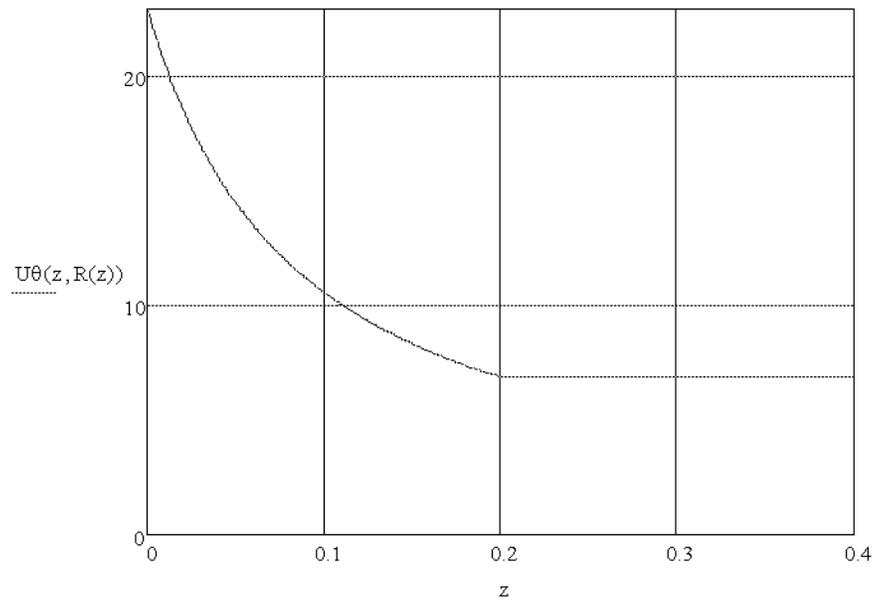
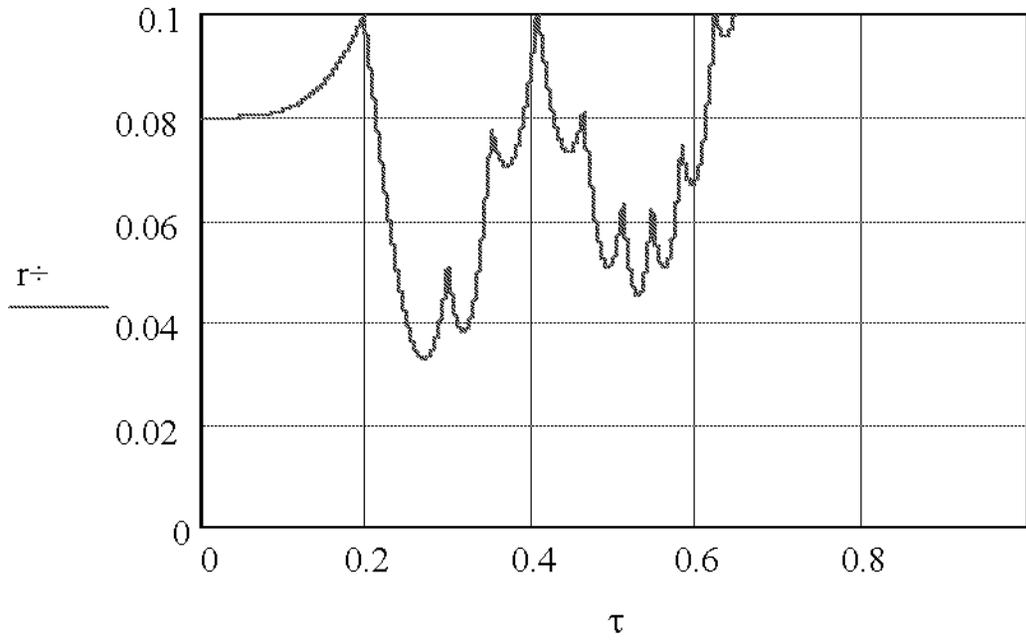
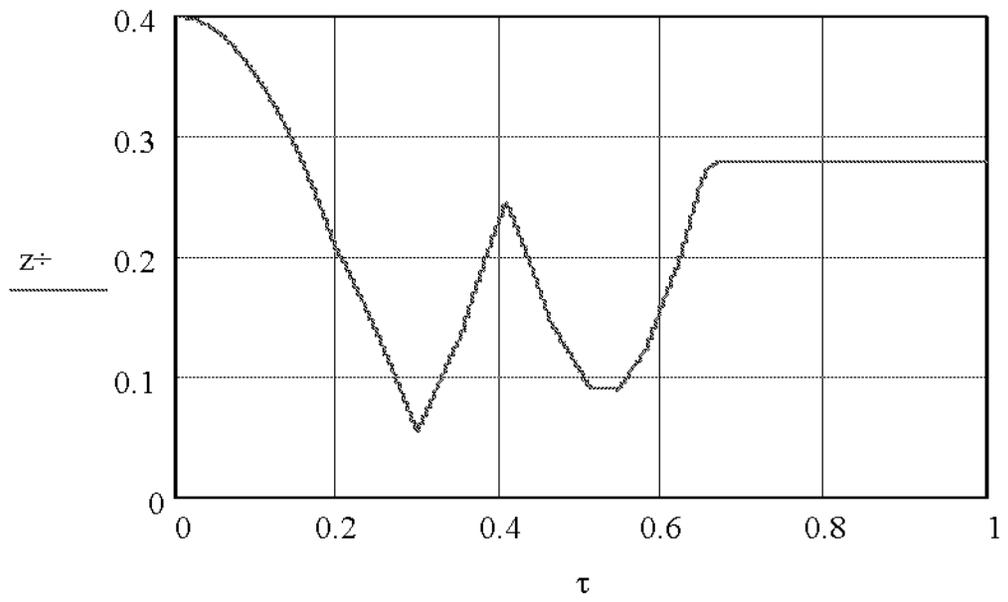


Рис. 3.7. Распределение тангенциальной скорости воздуха по высоте сушилки



a)



б)

Рис. 3.8. Зависимость координат частицы от времени.

а) - $r_q = r_q(\tau)$, б) - $z_q = z_q(\tau)$,

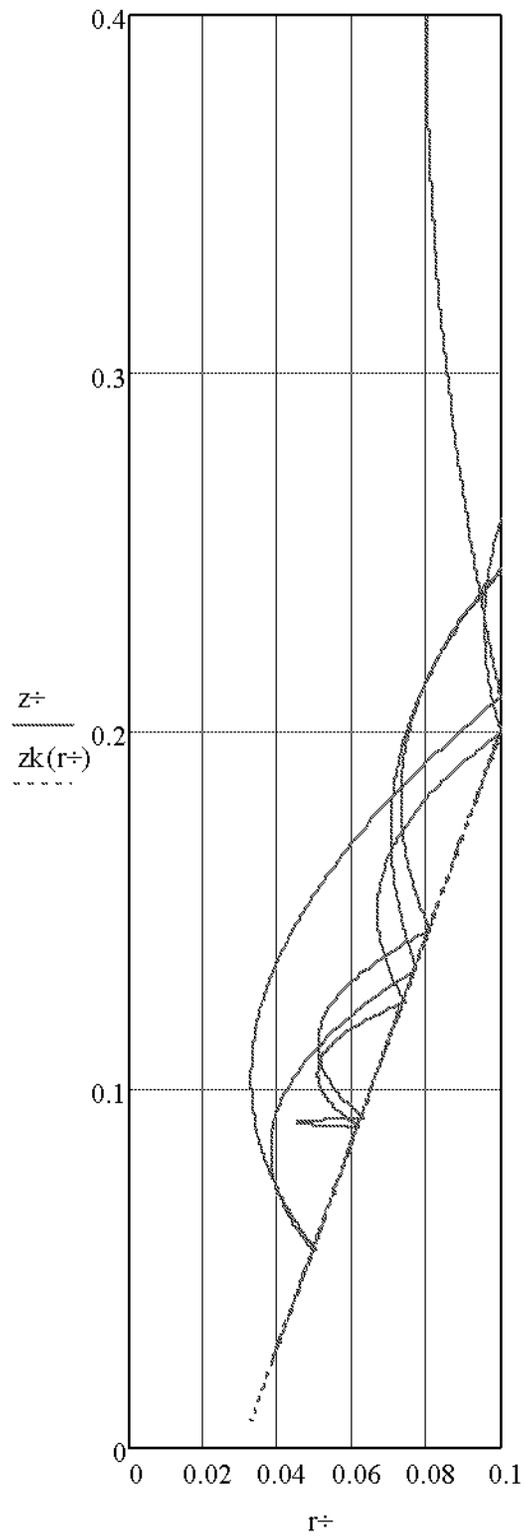
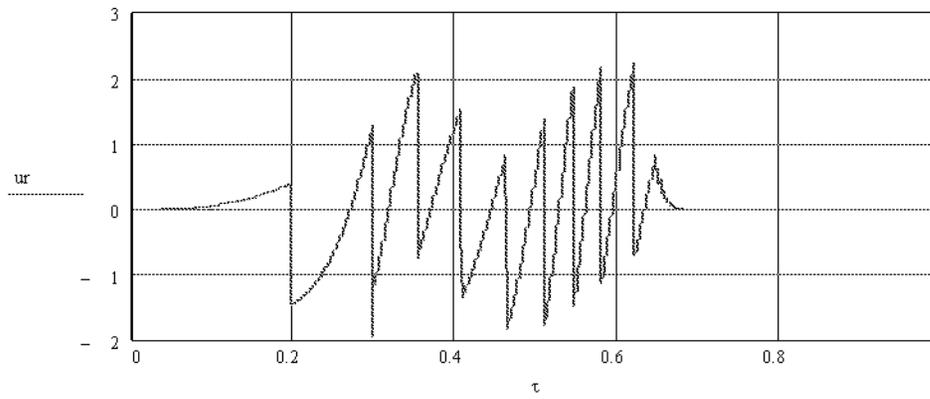
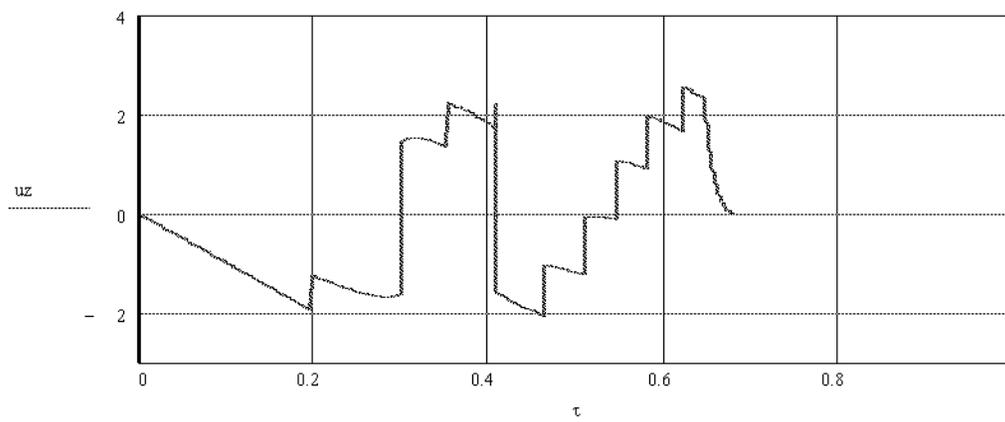


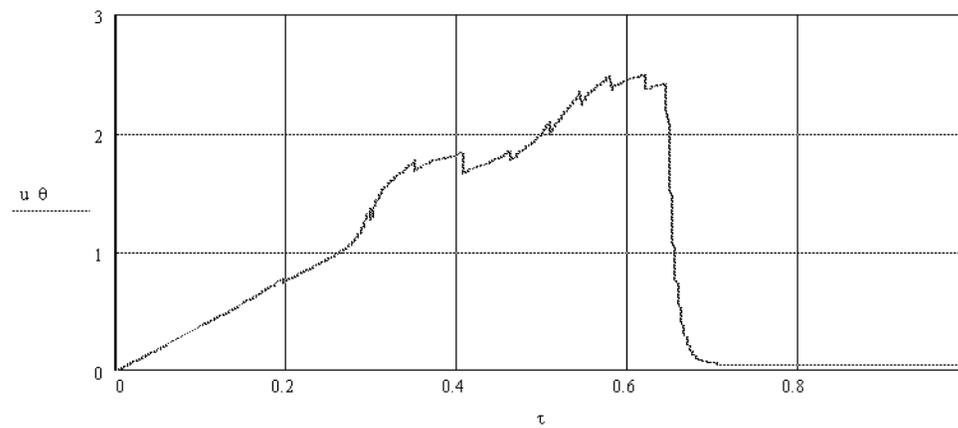
Рис.3.9. Траектория движения частицы в сушильной камере



а)



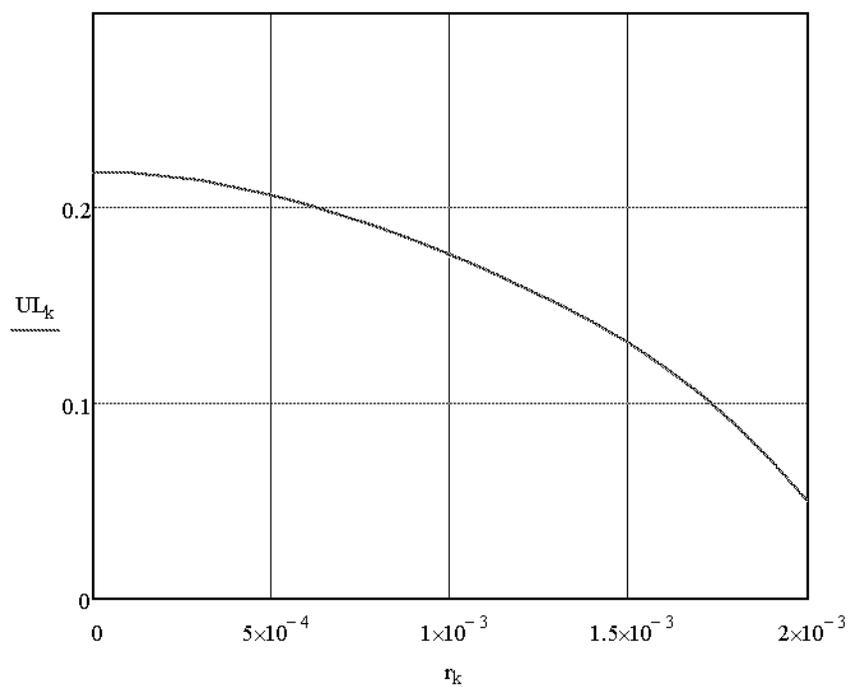
б)



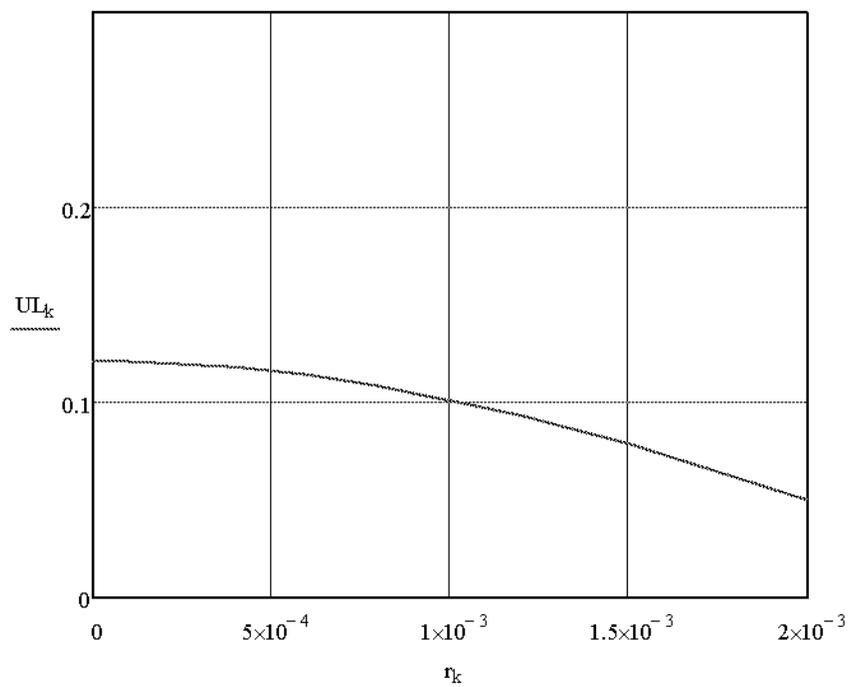
в)

Рис. 3.10. Зависимость скорости частицы от времени. а) - $u_r = u_r(\tau)$,

б) - $u_z = u_z(\tau)$, в) - $u_\theta = u_\theta(\tau)$,



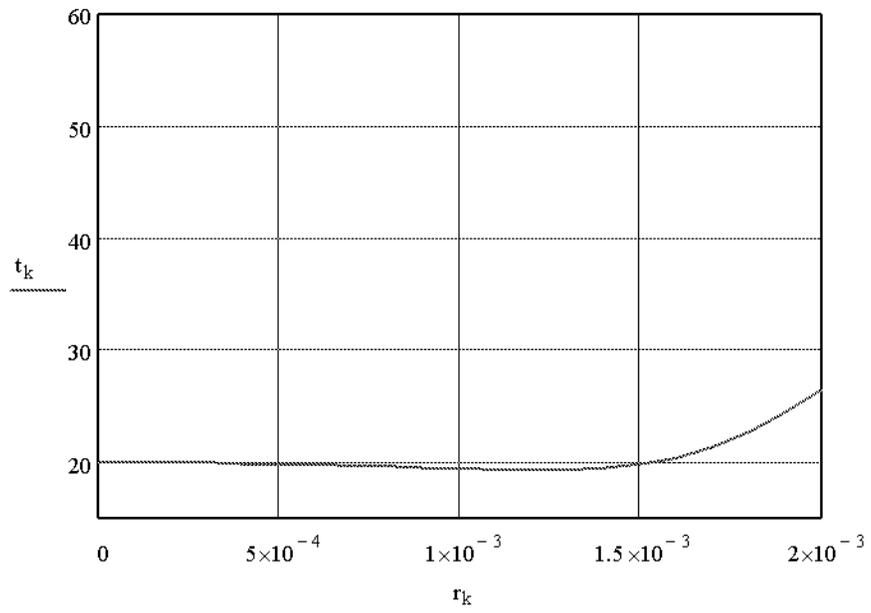
а)



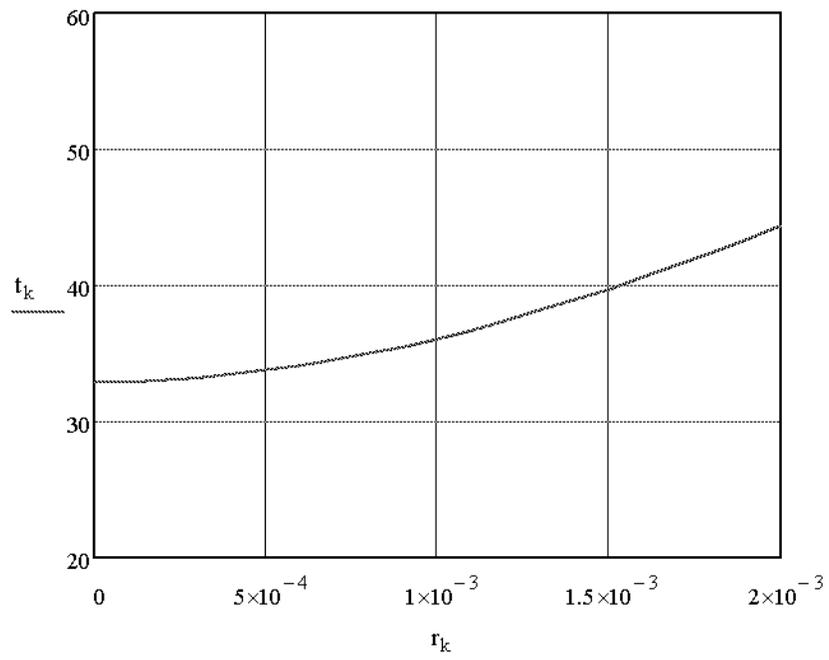
б)

Рис. 3.11. Распределение влагосодержания в частице.

а) – $\tau=5$ с, б) – $\tau=90$ с,



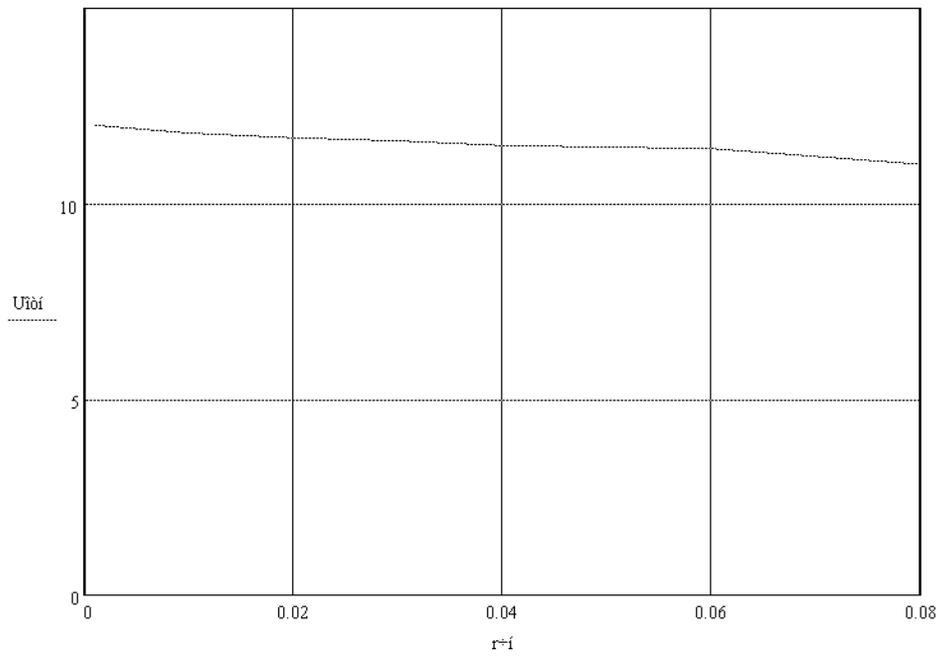
а)



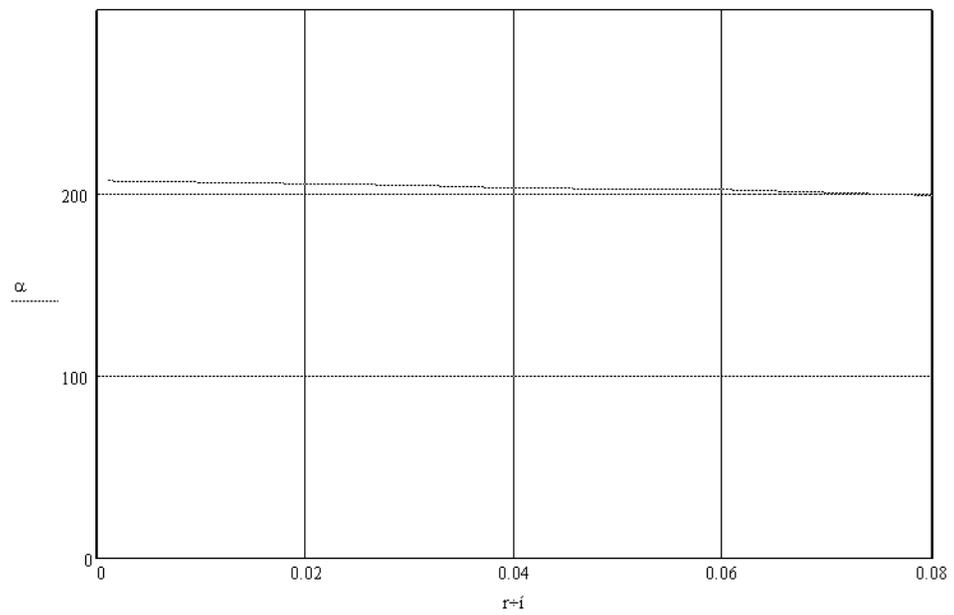
б)

Рис. 3.12. Распределение температуры в частице.

а) – $\tau=5$ с, б) – $\tau=90$ с,

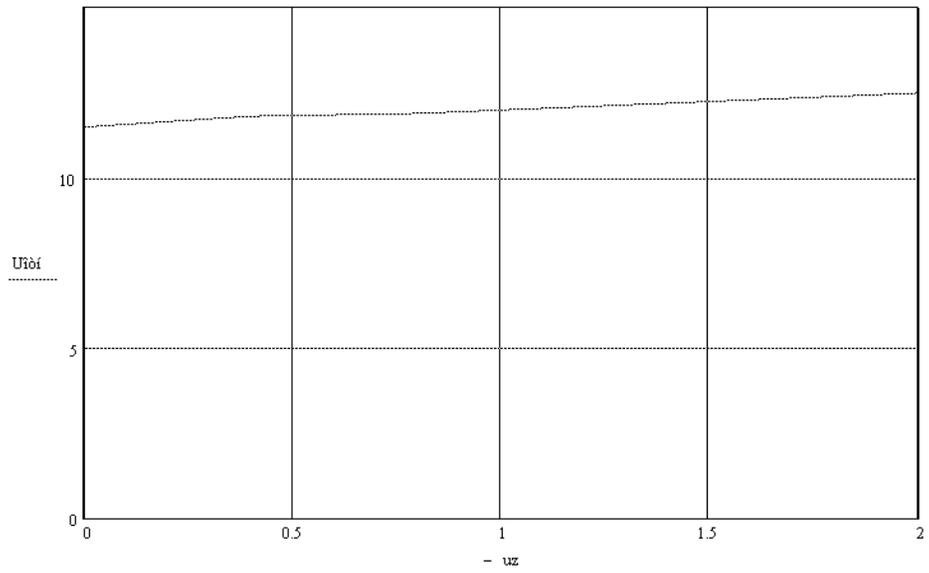


а)

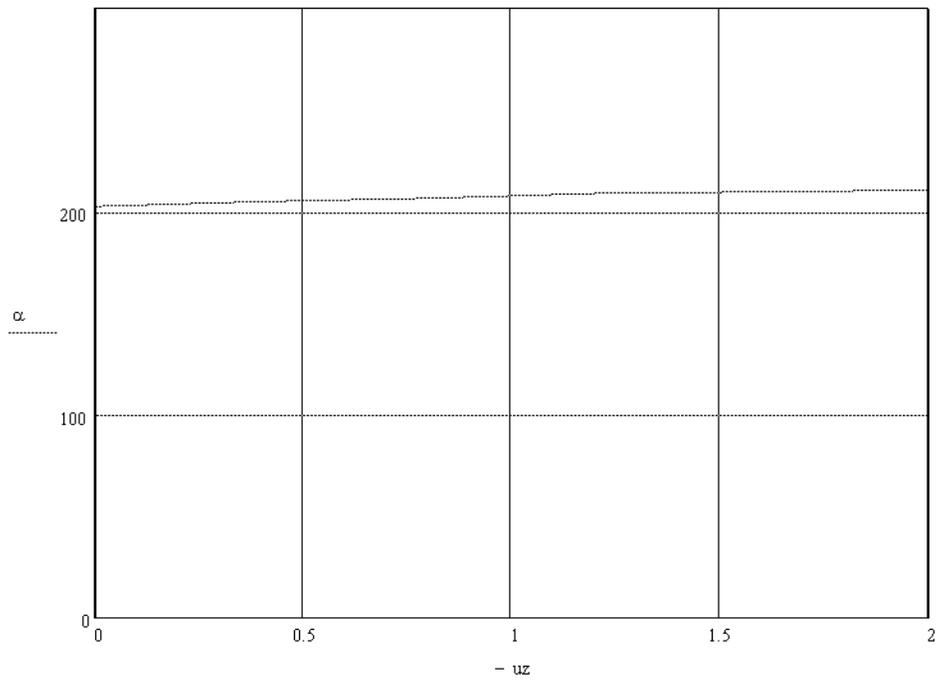


б)

Рис. 3.13. Зависимость относительной скорости газа (а) и коэффициента теплоотдачи (б) от начального радиуса частицы

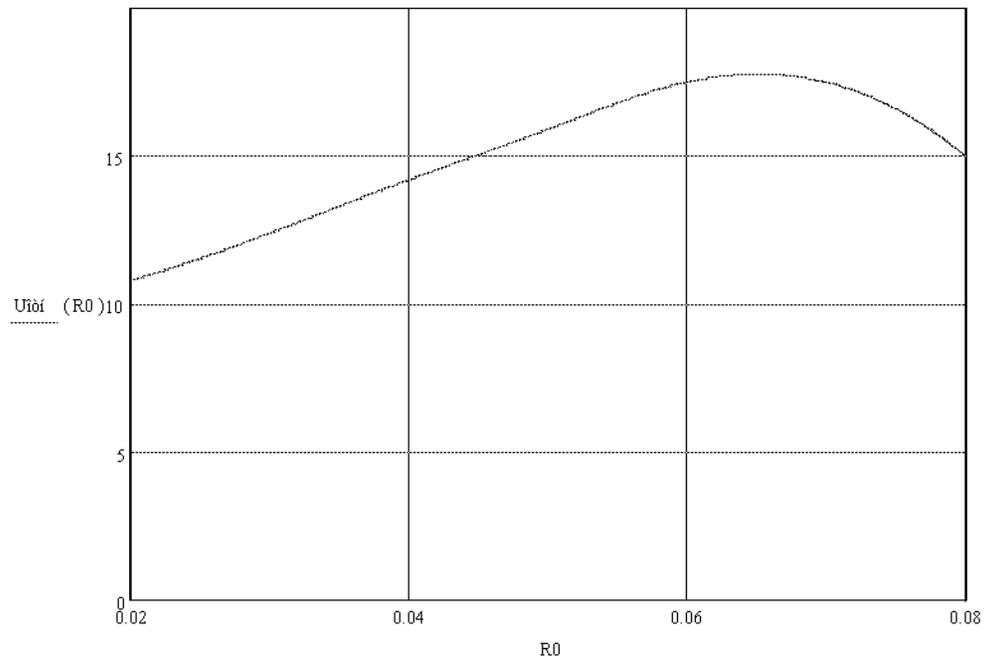


a)

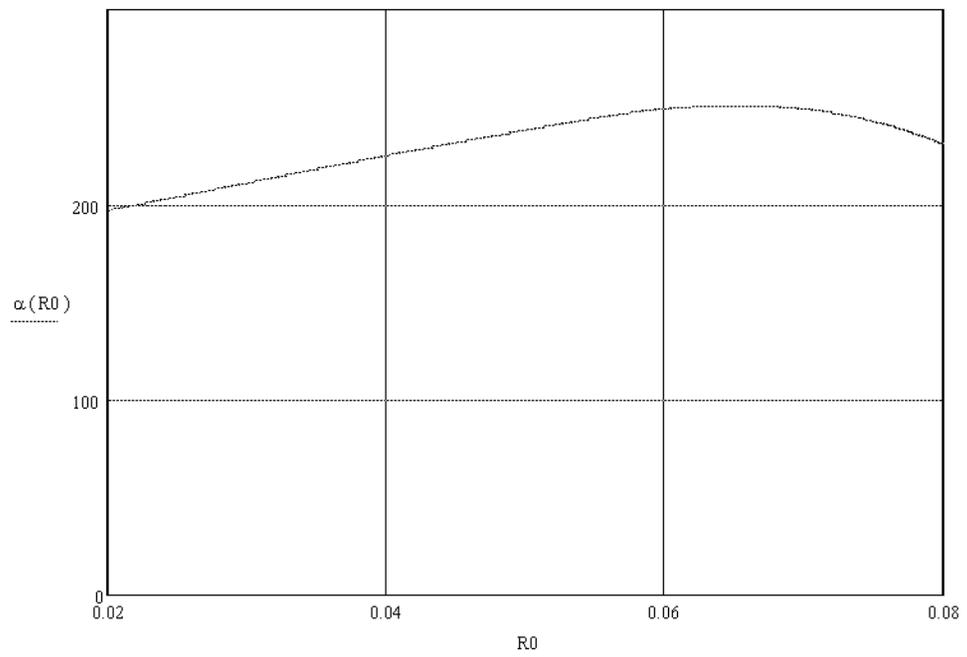


б)

Рис. 3.14. Зависимость относительной скорости газа (а) и коэффициента теплоотдачи (б) от начальной скорости частицы

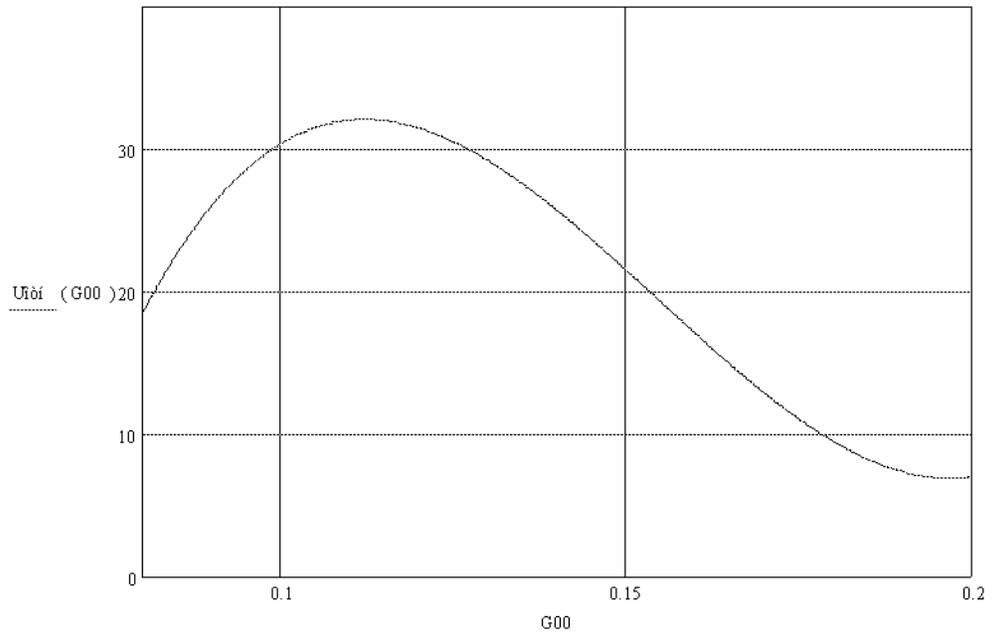


a)

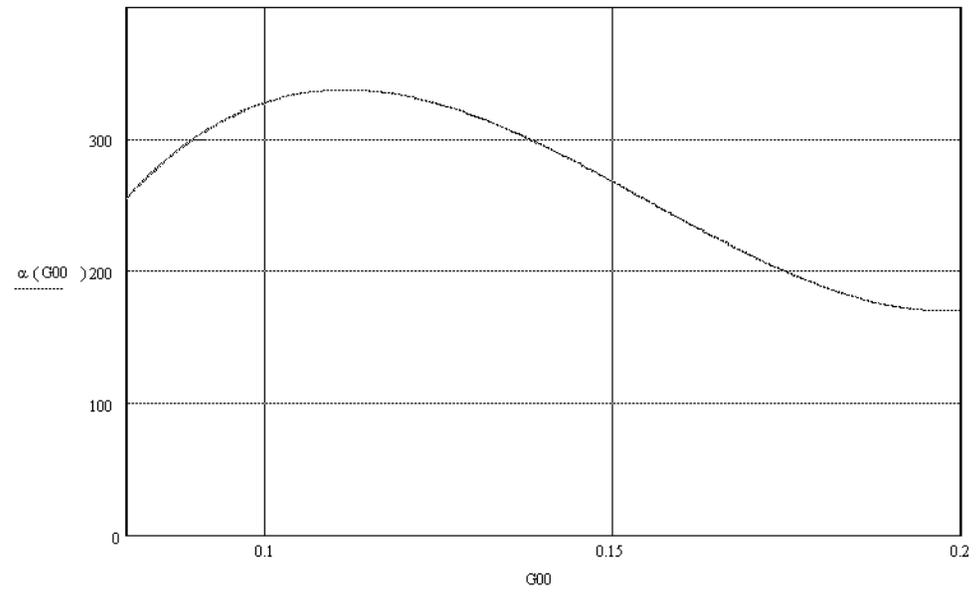


б)

Рис. 3.15. Зависимость относительной скорости газа (а) и коэффициента теплоотдачи (б) от радиуса нижнего входного отверстия



a)



б)

Рис. 3.16. Зависимость относительной скорости газа (а) и коэффициента теплоотдачи (б) от распределения воздушного потока между осевым и тангенциальными вводами

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА СУШКИ ГРЕЧИХИ В АППАРАТЕ С ЗАКРУЧЕННЫМ ПОТОКОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

4.1. Описание экспериментальной установки и методика проведения эксперимента

Для исследования гидродинамики и кинетики сушки гречихи нами была спроектирована и изготовлена экспериментальная сушильная установка с регулируемым закрученно-фонтанирующим потоком дисперсного материала, конструкция которой представлена на рис. 4.1.

Установка состоит из патрубка для подвода влажного продукта 1 цилиндрической обечайки 2 с окнами для выхода высушенного продукта и отработанного теплоносителя, конусного днища 3, крышки 4, которые в совокупности составляют сушильную камеру, патрубка 5 для подачи осевого потока Теплоносителя, на котором установлен завихритель 6, патрубок 7 для подачи тангенциального потока теплоносителя, служит для регулирования закрученности потока, решетка 8 предназначена для предотвращения попадания частиц материала в воздуховод. В верхней части цилиндрической обечайки 2 к окнам прикреплен патрубок 9 для отвода высушенного материала и отработанного теплоносителя.

Экспериментальная установка снабжена приборами и устройствами для управления и контроля за технологическими параметрами процесса.

Заданная температура теплоносителя подводимого в камеру 1 поддерживается автоматически с помощью Одноканальных ПИД регуляторов измерителей ОВЕН ТРМ10 (рис. 4.2) и трехфазным твердотельным реле КИРРИВОР 40А (рис. 4.3). Температура отработанного теплоносителя измерялась многофункциональным прибором SKYWATCH ATMOS (рис. 4.4)

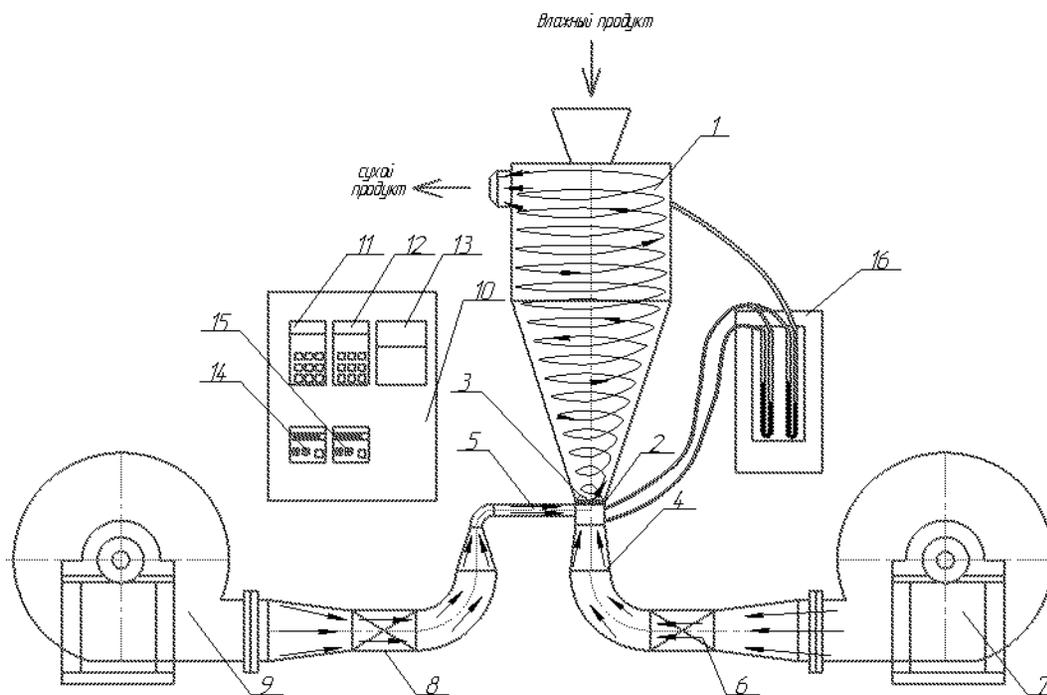


Рис. 3.1. Схема экспериментальной установки:

1 – сменная сушильная камера; 2- завихритель;
 3 – удерживающая решетка; 4 - осевой патрубок для подачи теплоносителя; 5 – тангенциальный патрубок для подачи теплоносителя; 6, 8 – калориферы; 7, 9 – вентиляторы; 10 – щит управления; 11, 12 – частотные преобразователи для регулирования подачи вентиляторов; 13 – электрический счетчик; 14, 15 – регуляторы температуры в калориферах; 16 – дифференциальный манометр

Терморегулятор ОВЕН ТРМ10 предназначен для измерения температуры или другой физической величины (веса, давления, влажности и т. п.), импульсного или аналогового регулирования по ПИД закону, а также

для формирования дополнительного сигнала, который может быть использован для сигнализации о выходе параметра за установленные границы или для двухпозиционного регулирования.

Для контроля относительной влажности теплоносителя на выходе из сушильной камеры осуществляется при многофункциональным прибором SKYWATCH ATMOS (рис. 4.4).

Относительная влажность воздуха измеряется в диапазоне: 2-100 %RH, разрешение: 0,5 %RH, точность: +3,5 % RH, цикл измерений: каждую секунду



Рис. 4.2. Терморегулятор ОВЕН ТРМ 10

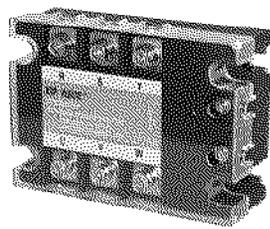


Рис. 4.3. твердотельное реле KIPPRIBOR



Рис. 4.4. многофункциональный прибор SKYWATCH ATMOS

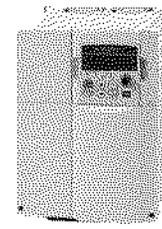


Рис. 4.5. частотными преобразователями Веспер

Расход и скорость воздуха. Измерение скорости воздуха на входе и выходе из сушильной камеры производилось многофункциональным прибором SKYWATCH ATMOS. Регулирование расхода воздуха осуществляется частотными преобразователями Веспер E2-8300 (рис. 4.5), путем изменения частоты вращения вентилятора.

Конфигурация камеры (рис. 4.6). Гречиха высушивалась в коническо-цилиндрической камере в нижней части, у меньшего основания которой, установлен завихритель (рис. 4.7)

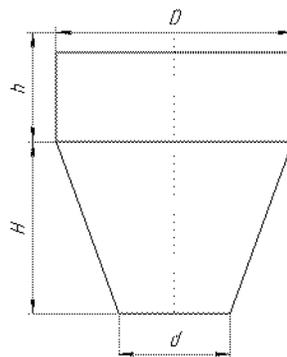


Рис. 4.6. Конфигурация сушильной камеры

и выполнено цилиндрическое кольцо, к которому тангенциально (по касательной) подключен патрубок для подвода закручивающего потока теплоносителя. Конструктивные размеры камеры менялись использованием различных конических вставок (рис. 4.8) разного размера: внутренний диаметр нижнего основания конуса – изменяется от 50 мм до 150, внутренний диаметр цилиндрической части – 300 мм, высота цилиндрической части – 200 мм, высота конической части 200, внутренний диаметр тангенциального па-

трубка – 30 мм.

Гидродинамика и кинетика процесса сушки. Эксперименты проводились с гречихой, начальной относительной влажностью 22 %

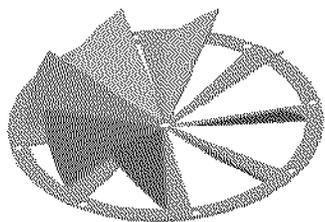


Рис. 4.7. Завихритель взвешивания.

Изучение современного состояния гидродинамики взвешенно-закрученного слоя вообще, и для гречихи в частности, позволило нам сделать вывод о необходимости дальнейшего исследования влияния на качество псевдооживления и закручивания слоя таких факторов, как геометрия аппарата, размер и форма частиц материала, высота слоя, способ подвода закручивающего дополнительного потока теплоносителя.

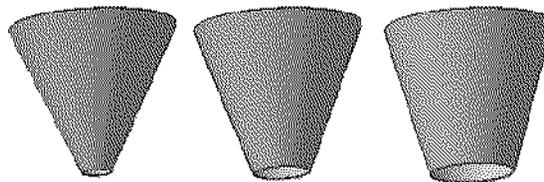


Рис. 4.8. сменные цилиндрические вставки

В настоящее время в исследованиях используются два метода экспериментального определения сопротивления кипящего слоя - прямой и косвенный. Прямой метод состоит в том, что фиксируется сопротивление материала непосредственно замером перепада



Рис. 4.9. Влагомер Farmex MT-PRO

давления над рабочей решеткой и над слоем. Косвенный метод основан на том, что замеряется общее сопротивление рабочей решетки и слоя материала, затем – сопротивление решетки без материала. Сопротивление материала Δp рассчитывается как разность полученных результатов [13, 35, 37, 76]. Нами определялась величина Δp прямым методом, поскольку косвенный метод дает значительную погрешность [13]. Для определения высоты слоя использовалась мерительная планка, установленная на наружной поверх-

ности сушильной камеры.

В экспериментах по изучению гидродинамики взвешенного слоя мы, изменяя скорость воздушного потока, измеряли сопротивление слоя и вели визуальные наблюдения за структурой слоя и характером его движения.

Для исследования кинетики гречихи установка выводилась на заданный режим работы путем ее прогрева горячим воздухом в течение 20...25 минут. Загрузка влажного материала и отбор проб производились через верхнюю часть сушильной камеры. Интервал времени при отборе проб составлял 1 минуту. Окончательную влажность гречихи, после завершения эксперимента, определялась электронным влагомером Farmex MT-PRO (рис. 4.9) и проверялась методом высушивания до постоянной массы в сушильном шкафу при температуре 378 К в течении 3-х часов [76].

Исследование кинетики сушки гречихи проводилось в стационарном режиме, параметры теплоносителя в каждом опыте поддерживались постоянными в интервале значений: расход осевого потока изменялась от 200 до 1200 м³/ч; расход тангенциального потока от 4 до 110 м³/ч; температура на входе в камеру – от 333 К до 383 К; удельная нагрузка на объем конической части сушильной камеры во всех опытах являлась величиной постоянной $G_{уд}^k = 25.2 \text{ кг/м}^3$.

4.2. Математическое планирование и обработка результатов эксперимента

Для исследования влияния параметров процесса сушки на качество получаемого продукта и обоснование режима сушки гречихи было выполнено планирование эксперимента, позволяющее варьировать одновременно все факторы и получать количественные оценки эффектов их взаимодействия.

4.2.1. Обоснование выбора и пределов изменения входных факторов

Исследования процесса сушки гречихи в сушилке с регулируемым закрученно-фонтанирующим потоком теплоносителя проводились нами на экспериментальной установке представленной на рис. 4.1.

Для изучения взаимодействия различных факторов, влияющих на процесс сушки, были применены математические методы планирования эксперимента [44, 45, 108]. Данный процесс имеет вид уравнения регрессии, найденного статистическими методами на основе экспериментов.

В нашем случае примем, что удельная нагрузка на объем конической части сушильной камеры является функцией вида $G_{y\partial}^k = f(m, V_k)$ и определяется следующей зависимостью

$$G_{y\partial}^k = \frac{m}{V_k} \quad (4.1)$$

где m – масса загружаемого материала, кг;

V_k – объем конической части сушильной камеры, м³.

$$V_k = \frac{1}{3} \pi \cdot H (R^2 + R \cdot r + r^2), \quad (4.2)$$

где R – внутренний диаметр цилиндрической части сушильной камеры, м;

r – внутренний диаметр нижнего основания конуса, м;

H – высота конической части сушильной камеры, м.

Учитывая (4.1, 4.2) запишем, что

$$G_{y\partial}^k = \frac{3 \cdot m}{\pi \cdot H (R^2 + R \cdot r + r^2)}. \quad (4.3)$$

Таким образом, видно, что $G_{y\partial}^k$ зависит и от геометрических размеров сушильной камеры.

Из ранее проведенных экспериментальных исследований установлено, что изменение осевого расхода теплоносителя Q_{oc} , м/с, от удельной нагрузки

на объем конической части сушильной камеры $G_{уд}^*$, кг/м³, при прорыве и последующем образовании канала в слое материала связаны между собой следующей зависимостью (рис. 4.10).

$$Q_{ос} = 294,33 + 7215,8 \cdot D^2 - 1652,8 \cdot D \quad (4.4)$$

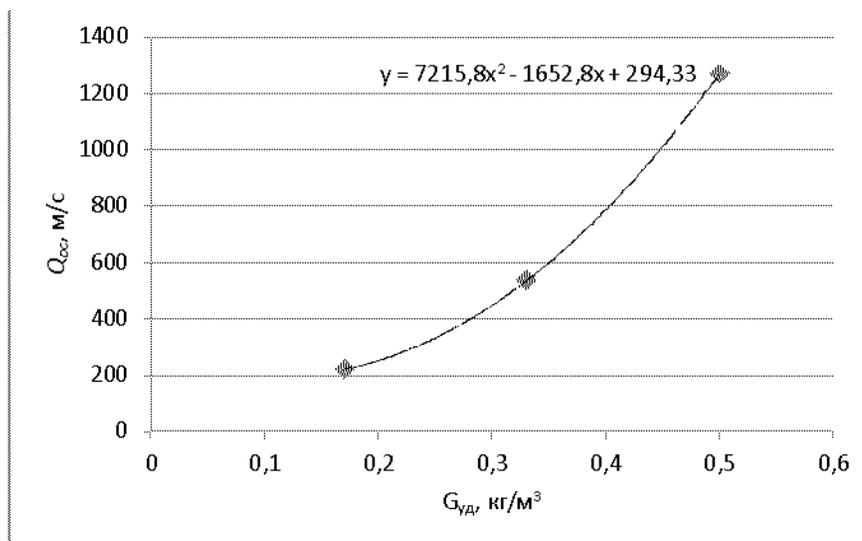


Рис. 4.10. Зависимость осевого расхода от от удельной нагрузки на объем конической части сушильной камеры

Для исследования и постановки опытов с целью определения оптимального режима сушки было применено центральное композиционное униформ – ротатабельное планирование и выбран полный факторный эксперимент типа 2^3 [45].

На основании литературных данных из множества факторов, влияющих на процесс сушки, для исследования были выбраны следующие: температура T теплоносителя, соотношение диаметров конической части корпуса D/d и расход Q_t тангенциально подводимого потока теплоносителя. От этих параметров зависит не только скорость сушки, но и качество высушиваемого материала. Изучая их взаимное влияние на процесс, можно выявить оптимальный режим сушки и оптимальную конструкцию камеры.

Выбор критериев оценки y обусловлен их наибольшей значимостью для процесса сушки. Так y_1 - удельные энергозатраты на килограмм готовой

продукции, определяет энергоемкость процесса и является одним из важных показателей, оценивающий его энергетическую эффективность, $(\text{кВт} \cdot \text{ч})/\text{кг}$; y_2 – напряжение объема сушильной камеры по испаренной влаге определяет производительность процесса, и напрямую связана с его скоростью, $\text{кг}_{\text{вл}}/(\text{м}^3 \cdot \text{ч})$.

Все изучаемые факторы были совместимы и некоррелируемы между собой, а пределы их изменения приведены в таблице 3.1. Выбор интервалов изменения факторов обусловлен технологическими условиями процесса сушки гречихи и техническими характеристиками сушилки.

Таблица 4.1

Пределы изменения факторов

Условия планирования	Кодированное значение	Значение факторов в точках плана		
		x_1	x_2	x_3
		D/d	T_{ca}, K	$Q_v, \text{м}^3/\text{ч}$
Основной интервал	0	0.33	358	57
Интервал варьирования	Δ	0.10	15	31.5
Верхний уровень	+1	0.43	373	88.5
Нижний уровень	-1	0.23	343	25.5
Верхняя «звездная точка»	+1,682	0.5	383	110
Нижняя «звездная точка»	-1,682	0.17	333	4

Удельная нагрузка на объем конической части сушильной камеры во всех опытах являлась величиной постоянной $=25.2 \text{ кг}/\text{м}^3$. Программа исследований была заложена в матрицу планирования. Матрица планирования и результаты эксперимента представлены в таблице 3.2.

4.2.2. Анализ регрессионных моделей

При обработке экспериментальных данных для уровня значимости $q=0,05$ применялись следующие статистические критерии [44, 45, 108]: проверка однородности дисперсий – критерий Кохрена, представляющий отношение наибольшей из дисперсий к сумме их всех; проверка отдельных коэффициентов регрессии на значимость – критерий Стьюдента, который брался

из соответствующих таблиц в зависимости от уровня значимости и числа степеней свободы; адекватность математической модели – критерий Фишера.

Таблица 4.2

Матрица планирования и результаты эксперимента

Опыты	Кодированные значения факторов			Физические значения факторов			Удельные энергозатраты U_1 , (кВт·ч)/кг	Напряженные объемы U_2 , кг _{вп} /(м ³ ·ч)
	x_1	x_2	x_3	D/d	$T_{св}, K$	$Q_0, м^3/ч$		
1	-1	-1	-1	0.23	343	25,5	2,749	4,868
2	-1	+1	-1	0.23	373	25.5	3,140	5,813
3	+1	-1	-1	0.43	343	25.5	2,110	5,494
4	+1	+1	-1	0.43	373	25.5	2,380	6,729
5	-1	-1	+1	0.23	343	88.5	2,960	5,394
6	-1	+1	+1	0.23	373	88.5	3,167	6,580
7	+1	-1	+1	0.43	343	88.5	2,258	6,174
8	+1	+1	+1	0.43	373	88.5	2,361	7,777
9	-1,682	0	0	0.17	358	57	3,247	5,357
10	+1,682	0	0	0.5	358	57	1,634	6,785
11	0	-1,682	0	0.33	333	57	2,168	5,127
12	0	+1,682	0	0.33	383	57	2,617	7,200
13	0	0	-1,682	0.33	358	4	2,572	5,440
14	0	0	+1,682	0.33	358	110	2,766	6,661
15	0	0	0	0.33	358	57	2,501	5,989
16	0	0	0	0.33	358	57		
17	0	0	0	0.33	358	57		
18	0	0	0	0.33	358	57		
19	0	0	0	0.33	358	57		
20	0	0	0	0.33	358	57		

После статистической обработки данных, приведенных в таблице 4.2, с учетом значимости коэффициентов получены уравнения регрессии, адекватно описывающие процесс сушки гречихи под влиянием исследуемых факторов:

$$y_1 = 2,6 - 0,11x_1 - 0,09x_2 - 0,03x_3 - 0,04x_1^2 - 0,06x_2^2 - 0,03x_3^2 - 0,06x_1x_2 - 0,03x_1x_3 - 0,08x_2x_3; \quad (4.5)$$

$$y_2 = 15,27 + 0,28x_1 + 0,75x_2 + 0,97x_3 - 0,68x_1^2 - 0,28x_2^2 - 0,36x_3^2 + 0,27x_1x_2 + 0,11x_1x_3 + 0,37x_2x_3. \quad (4.6)$$

Анализ уравнения регрессии (4.5-4.6) позволяет выделить факторы, наиболее влияющие на рассматриваемый процесс сушки.

На удельные энергозатраты наибольшее влияние оказывает отношение d/D и температура теплоносителя, наименьшее – расход тангенциально подводящего потока. Степень влияния параметров относительно друг друга $b_1:b_3 = 3,667$, причем знак плюс перед коэффициентом при линейных членах указывает на то, что при увеличении входного параметра значение выходного параметра увеличивается, а знак минус – убывает.

На напряжение сушильной камеры по испаренной влаге наибольшее влияние оказывает отношение диаметров d/D и в меньшей степени – температура теплоносителя. Отношение коэффициентов, стоящих перед линейными членами, показывающие степень влияния параметров относительно друг друга, оказались равными: $b_3:b_1 = 3,464$.

Полученные уравнения (4.5-4.6.) нелинейны. Таким образом, в результате выполнения 20-ти опытов получена информация о влиянии факторов и построена математическая модель процесса, позволяющая рассчитать удельные энергозатраты на 1 кг высушенного материала, напряжение сушильной камеры по испаренной влаге, внутри выбранных интервалов варьирования входных факторов.

4.3. Исследование влияния основных факторов на кинетику процесса сушки гречихи в аппарате с закрученным потоком теплоносителя

Под кинетикой процесса сушки понимают изменение среднего влагосодержания и средней температуры тела с течением времени. Эти закономерности кинетики процесса сушки позволяют рассчитать количество испаренной влаги из материала и расход тепла на сушку.

В условиях оптимального гидродинамического режима с использованием метода планирования эксперимента нами проведены исследования ки-

нетики сушки и теплообмена гречихи в аппарате с закрученным потоком теплоносителя (рис. 4.1). Согласно полученным зависимостям (рис. 4.11-4.13) можно найти время сушки, соответствующее определенной влажности W^c .

4.3.1. Исследование зависимости кинетики сушки от соотношения диаметров конической части сушильной камеры d/D

Полученные кривые свидетельствуют о том, что соотношение диаметров конической части корпуса в сушилке с закрученными потоками оказывает существенное влияние на скорость сушки гречихи. Анализ кривых показывает, что в начале процесса, когда влажность материала уменьшается по кривой, имеет место кратковременная стадия прогрева материала. Продолжительность этой стадии зависит от высоты слоя продукта (чем меньше соотношение, тем выше высота слоя).

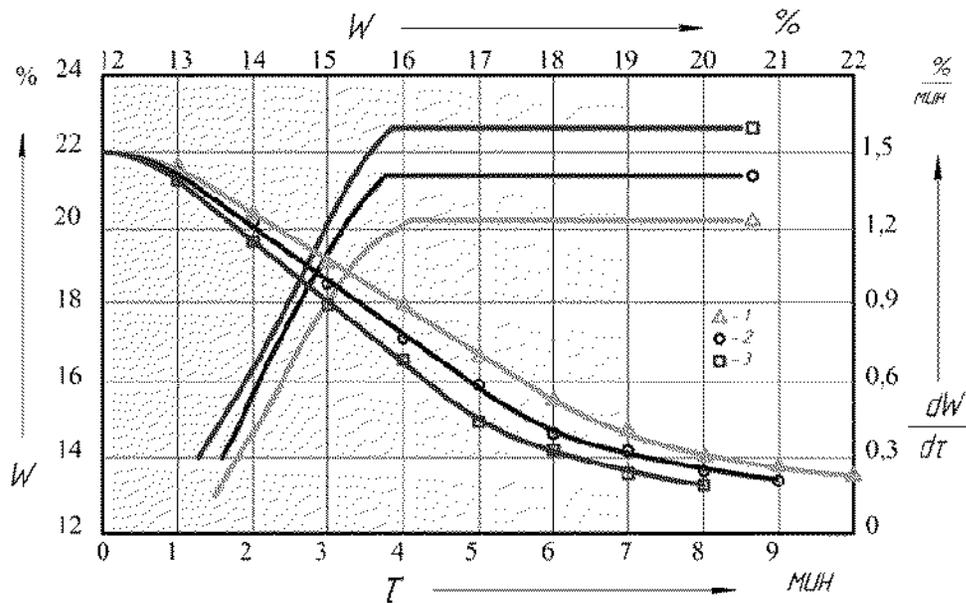


Рис. 4.11. Кривые сушки и скорости сушки гречихи:

1 – $D/d=0.5$, $T_{ca}=358$ К, $Q\tau=31$ м³/ч

2 – $D/d=0.33$, $T_{ca}=358$ К, $Q\tau=31$ м³/ч

3 – $D/d=0.17$, $T_{ca}=358$ К, $Q\tau=31$ м³/ч

4.3.2. Исследование зависимости кинетики сушки от температуры теплоносителя

Одна из актуальных задач при исследовании процессов сушки различных материалов – установление однозначной зависимости между влагосодержанием и температурой материала в процессе его обезвоживания.

Полученные кривые свидетельствуют о том, что температура теплоносителя является одним из наиболее существенных факторов, влияющим на скорость сушки семян. Следует отметить, что температура теплоносителя оказывает влияние на соотношения периодов постоянной и убывающей скоростей сушки. С повышением температуры наблюдается снижение критической влажности. Это объясняется тем, что увеличение температуры интенсифицирует внутреннюю диффузию влаги, а также увеличением доли связанной влаги, испарение которой происходит в первый период сушки.

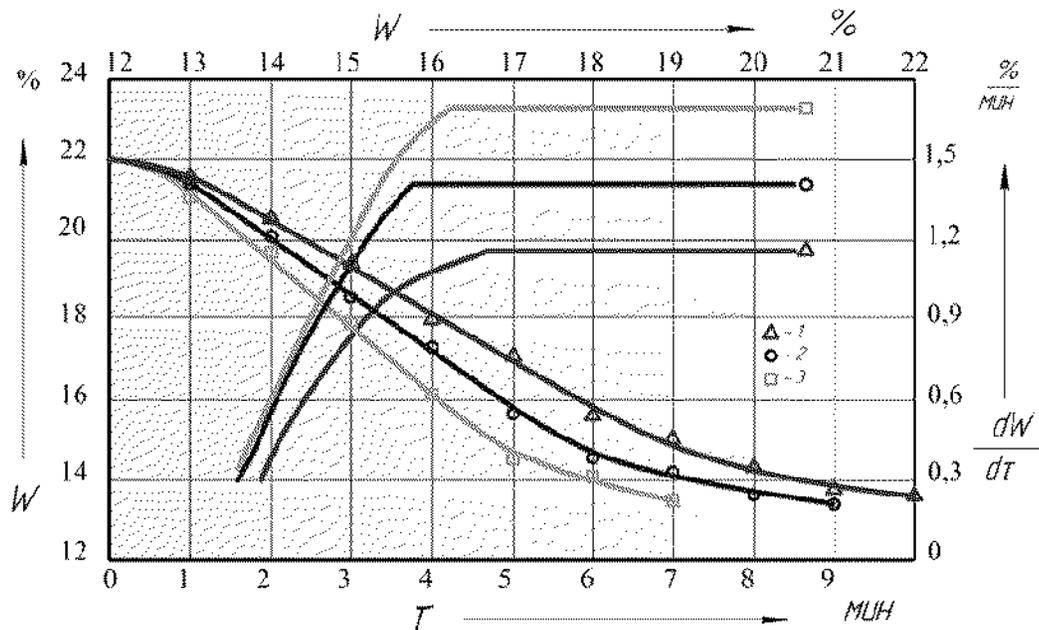


Рис. 4.12. Кривые сушки и скорости сушки гречихи:

1 – $D/d=0.33$, $T_{ca}=338$ К, $Q_{\tau}=31$ м³/ч

2 – $D/d=0.33$, $T_{ca}=358$ К, $Q_{\tau}=31$ м³/ч;

3 – $D/d=0.33$, $T_{ca}=383$ К, $Q_{\tau}=31$ м³/ч

Из рисунка видно, что наибольшая часть влаги удаляется в период по-

стоянной скорости сушки. Это объясняется тем, что семена гречихи содержат большое количество осмотической и адсорбционно-связанной влаги. Наличие периода постоянной скорости сушки говорит о том, что интенсивность диффузии влаги превышает интенсивность влагообмена

4.3.3. Исследование зависимости кинетики сушки от расхода осевого потока теплоносителя

Влияние расхода тангенциального расхода теплоносителя на кинетику сушки гречихи в сушилке с закрученными потоками теплоносителя представлено на рис. 4.13.

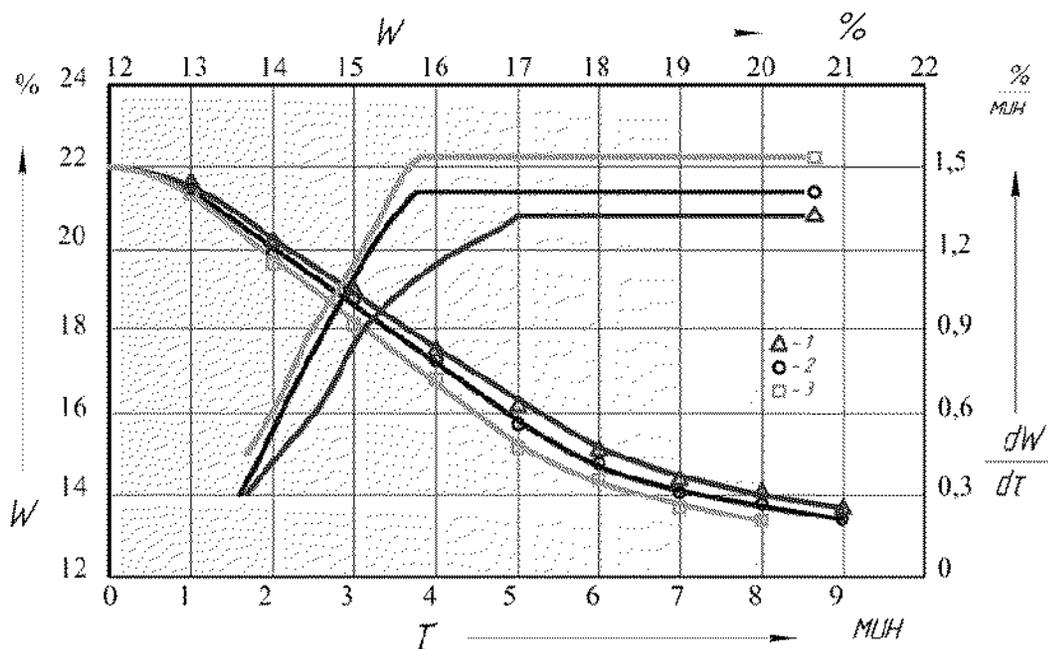


Рис. 4.13. Кривые сушки и скорости сушки гречихи:

1 – $D/d=0.33$, $T_{ca}=358$ К, $Q_{\tau}=4$ м³/ч

2 – $D/d=0.33$, $T_{ca}=358$ К, $Q_{\tau}=31$ м³/ч

3 – $D/d=0.33$, $T_{ca}=358$ К, $Q_{\tau}=110$ м³/ч

Из графика видно, что величина тангенциального расхода теплоносителя в незначительной степени влияет на изменение скорости влагоудаления по отношению к другим факторам.

Установлено, что скорость сушки гречихи в начале процесса резко увеличивается, (период прогрева), достигает максимального значения и остается постоянной (первый период). Когда влажность продукта достигнет первой

критической точки, скорость сушки уменьшается по кривой, обращенной выпуклостью к оси ординат. Для такой формы кривой первая ее часть (читая график, справа налево) соответствует перемещению капиллярной влаги при решающем влиянии коэффициента диффузии, а вторая часть – адсорбционно-связанной. Вторая критическая точка (точка перегиба кривой скорости сушки) соответствует границе адсорбционной и капиллярной влаги

4.4. Многофакторный статистический анализ процесса сушки гречихи

Повышение активности гидродинамической обстановки в сушильном аппарате связано с увеличением межфазных относительных скоростей, подвижности и столкновения частиц, а соответственно среднего коэффициента теплоотдачи α , что интенсифицирует процесс, однако требует роста затрат. Поэтому в каждом конкретном случае необходимо решать задачу оптимизации – поиска условного минимума затрат при наложении ряда связей, которые определяются из математического описания сушильного процесса.

Как указывалось ранее, для изучения взаимодействия различных факторов, влияющих на процесс сушки, были применены математические методы планирования эксперимента. Были найдены статистическими методами на основе экспериментов уравнения регрессии, адекватно описывающие процесс сушки гречихи под влиянием исследуемых факторов.

Несмотря на достигнутый результат, представлялось интересным исследование поверхности отклика по уравнениям (4.5, 4.6), как для установления влияния факторов, так и для выявления оптимальных режимов процесса конвективной сушки гречихи в аппарате с закрученным потоком теплоносителя.

Задача оптимизации сформулирована следующим образом: найти такие режимы работы сушильной установки, которые бы в широком диапазоне изменения входных параметров составляли минимум удельных энергозатрат и

максимальное напряжение объема сушильной камеры по испаренной влаге. Общая математическая постановка задачи оптимизации представлена в виде следующей модели:

$$\begin{aligned} q &= q(y_1, y_2)_{x \in D} \longrightarrow \text{opt} \\ D: y_1(x_1, x_2, x_3)_{x \in D} &\longrightarrow \text{min} \\ y_2(x_1, x_2, x_3)_{x \in D} &\longrightarrow \text{max} \end{aligned} \quad (4.7)$$

Введем предположение, что полученные уравнения регрессии (4.5, 4.6.) описывают некоторые поверхности в многомерном пространстве, а по коэффициентам канонической формы установим, к какому виду тел относятся эти поверхности.

Координаты центра x_{is} находили из системы уравнений, полученных в результате дифференцирования уравнений регрессии (4.5, 4.6.) по x_1, x_2, x_3 и приравнивания производных нулю. Зная координаты центра x_{is} по уравнениям (4.5, 4.6.) определили соответствующие им значения параметров оптимизации y_{is} . Результаты вычислений представлены в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Оптимальные значения входных факторов

y_i	x_{1s}	x_{2s}	x_{3s}	y_s
y_1	0,027	1,682	-1,544	0,462
y_2	-0,187	0,134	1,413	1,672

Для нахождения канонических коэффициентов B_i по уравнениям (4.6, 4.7) составлен характеристический полином, который приравняли к нулю [1 23]:

$$\begin{vmatrix} (b_{11} - B) & 0,5b_{12} & 0,5b_{13} \\ 0,5b_{21} & (b_{22} - B) & 0,5b_{23} \\ 0,5b_{31} & 0,5b_{32} & (b_{33} - B) \end{vmatrix} = 0 \quad (4.8)$$

где B – канонический коэффициент.

В результате подстановки значений коэффициентов уравнений регрессии (4.5, 4.6.) в матрицу (4.8) и решения нелинейных уравнений 3-ей степени были получены канонические коэффициенты. Анализ полученных канониче-

ских уравнений показал, что исследуемые тела в трехмерном пространстве относятся к типу "минимакса": при движении в направлении осей, у которых x_i положительны, от центра оптимизации значения выходных параметров увеличиваются, а в направлении осей, для которых x_i отрицательны – уменьшаются, так как знаки коэффициентов канонических уравнений противоположны, то поверхности отклика представляют собой одно- или двухполосный гиперboloид [45, 123].

На рис. 4.14-4.19 показаны кривые равных значений выходных параметров, которые несут смысл номограмм и представляют практический интерес.

Для определения оптимальных режимов использовали метод "ридж-анализ", который базируется на методе неопределенных множителей Лагранжа [123]. Для выбора оптимального режима по уравнениям регрессии (4.5, 4.6.) составляли следующую систему уравнений

$$\begin{cases} (b_{11} - \lambda)x_1 + 0,5b_{12}x_2 + 0,5b_{13}x_3 + 0,5b_1 = 0 \\ 0,5b_{21}x_1 + (b_{22} - \lambda)x_2 + 0,5b_{23}x_3 + 0,5b_2 = 0, \\ 0,5b_{31}x_1 + 0,5b_{32}x_2 + (b_{33} - \lambda)x_3 + 0,5b_3 = 0 \end{cases} \quad (4.09)$$

где λ – неопределенный множитель Лагранжа.

На величину λ накладывается ограничение, определяемое параметром Хорля [123]

$$\lambda' = 2(B_{\min}^{\max} - b_{kk}), \quad (4.10)$$

где B_{\min}^{\max} – максимальный или минимальный (в зависимости от задачи) канонический коэффициент;

b_{kk} – коэффициент регрессии при k -ом квадратичном члене.

В данном случае допустимые значения λ лежали в пределах:

– удельные энергозатраты:

$$0,021 < \lambda < 0,030; \quad (4.11)$$

–напряжение объема сушильной камеры по испаренной влаге:

$$-0,196 < \lambda < -0,182 \quad (4.12)$$

Задаваясь значениями λ из интервалов (4.11, 4.12), по уравнениям (4.5) были вычислены оптимальные режимы процесса сушки гречихи для удельных энергозатрат и напряжения объема сушильной камеры по испаренной влаге. Результаты расчетов оптимальных интервалов изменения удельных энергозатрат представлены в табл.4.4.

Как уже отмечалось выше, при выборе оптимальных значений удельных энергозатрат необходимо исходить из их минимально допустимых значений при ограничениях на независимые переменные согласно (4.7). Для такого режима $\lambda = 0,027$, т.е. $x_1 = 1,682$; $x_2 = -1,544$; $x_3 = 0,462$ или, переходя от кодированных значений x_i к натуральным, имеем соотношение диаметров конической и цилиндрической части $d/D x_1 = 0,5$, Температуру теплоносителя $x_2 = 334,8 K$, объем тангенциально подводимого потока теплоносителя $x_3 = 71,55 m^3/ч$. В этом случае удельные энергозатраты имеют значения $y_1 = 2,170$ (кВт·ч)/кг.

Таблица 4.4

Оптимальные значения удельных энергозатрат

λ	x_1	x_2	x_3	y_1 , (кВт·ч)/кг
0,021	1,358	-5,183	-0,247	2,427
-0,022	1,884	1,803	0,435	2,212
-0,023	1,863	-1,789	0,446	2,201
-0,024	1,640	-1,736	0,448	2,195
-0,025	1,651	-1,700	0,451	2,191
0,026	1,672	-1,634	0,455	2,182
0,027	1,682	-1,544	0,462	2,170
0,028	1,724	-1,463	0,470	2,160
0,029	1,738	-1,414	0,475	2,153
0,030	1,752	-1,368	0,480	2,147

В интервале изменения $\lambda \in [0,021; 0,030]$ значения параметров x_i лежали в следующих интервалах: $x_1 = 0,466...0,505$; $x_2 = 280,5...334,8K$; $x_3 = 49,21...72,12 m^3/ч$. При таких значениях параметров удельные энергозатраты лежали в диапазоне $y_1 = 2,147...2,427$ (кВт·ч)/кг. Отмеченные интервалы изменения независимых переменных для параметра оптимизации y_1 сле-

дует принять за оптимальные.

Результаты расчетов оптимальных интервалов напряжения объема сушильной камеры по испаренной влаге представлены в табл. 4.5.

Как уже отмечалось выше, при выборе оптимальных параметров напряжения объема сушильной камеры по испаренной влаге необходимо исходить из их максимально допустимых значений.

Таковыми значениями в данном случае являются $\lambda = -0,187$, т.е.: $x_1 = 0,134$; $x_2 = 1,413$; $x_3 = 1,672$ или, переходя от кодированных значений x_i к натуральным, имеем $x_1 = 0,343$; $x_2 = 380$ К; $x_3 = 109$ м³/ч. В этом случае напряжение объема сушильной камеры по испаренной влаге равнялось $y_2 = 18,272$ кг_{вл}/(м³·ч).

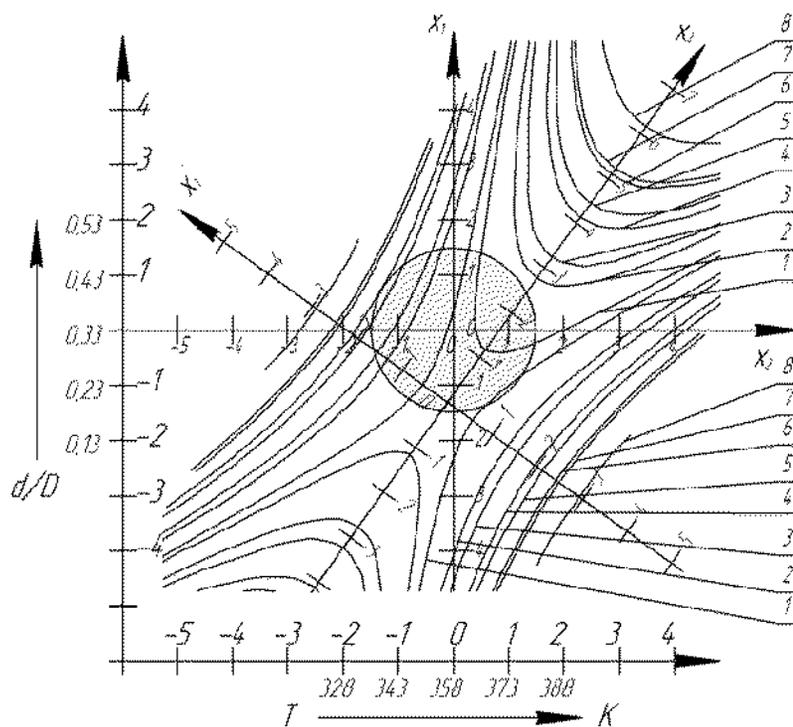


Рис. 4.14. Кривая равных значений удельных энергозатрат, (кВт·ч)/кг, от соотношения d/D и температуры теплоносителя T_{ca} , К:
 1 – 1,18; 2 – 1,98; 3 – 2,15; 4 – 2,31; 5 – 2,48; 6 – 2,65; 7 – 2,82; 8 – 2,99;
 9 – 3,16; $Q_v = 57$ м³/ч

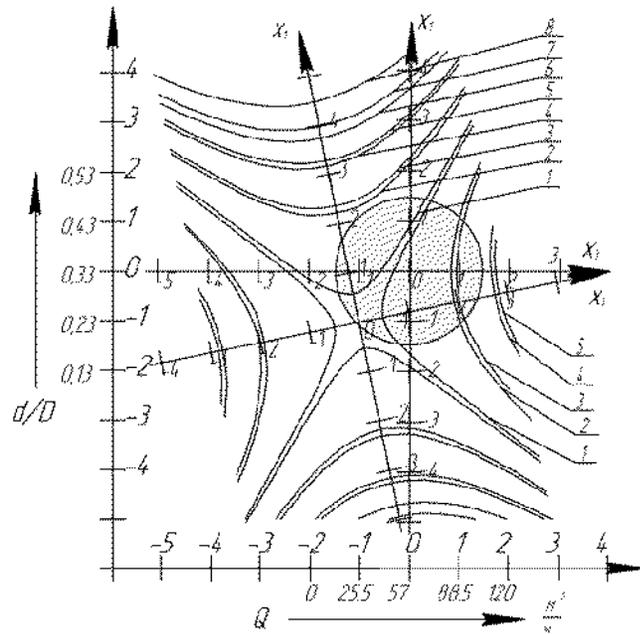


Рис. 4.15. Кривая равных значений удельных энергозатрат, (кВт·ч)/кг, от соотношения d/D и объема тангенциально подводимого потока теплоносителя $m^3/ч$: 1 – 1,18; 2 – 1,98; 3 – 2,15; 4 – 2,31; 5 – 2,48; 6 – 2,65; 7 – 2,82; 8 – 2,99; 9 – 3,16; $T_0 = 358$ К

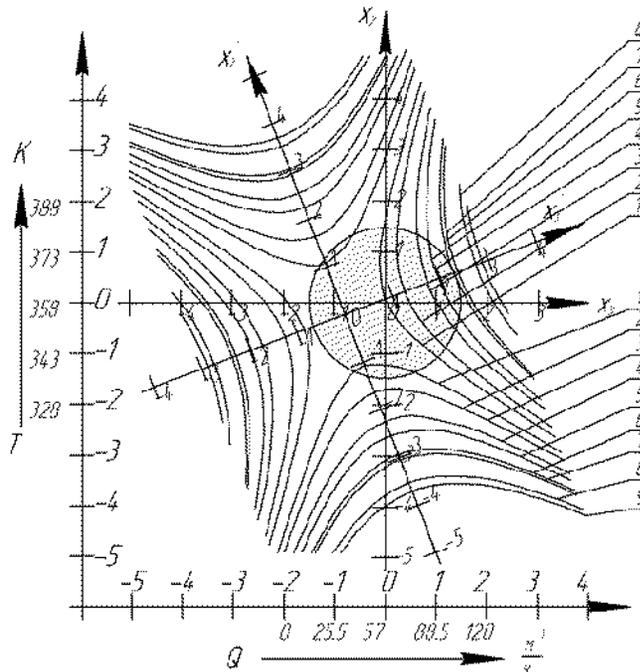


Рис. 4.16. Кривая равных значений удельных энергозатрат, (кВт·ч)/кг, от температуры теплоносителя T , К и объема тангенциально подводимого потока теплоносителя $m^3/ч$: 1 – 1,18; 2 – 1,98; 3 – 2,15; 4 – 2,31; 5 – 2,48; 6 – 2,65; 7 – 2,82; 8 – 2,99; 9 – 3,16; $d/D = 0,33$

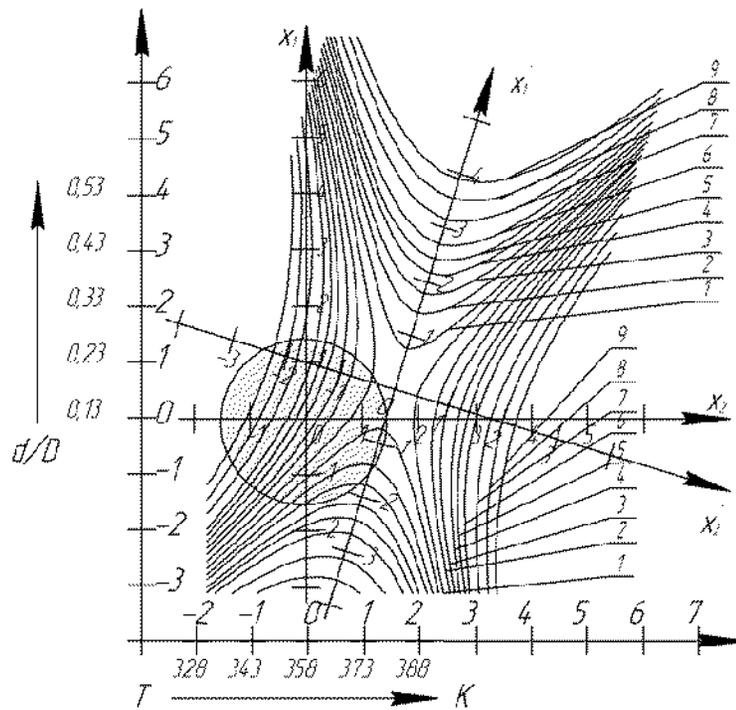


Рис. 4.17. Кривая равных значений напряжения объема сушильной камеры по испаренной влаге, $\text{кг}_{\text{вл.}}/(\text{м}^3\text{ч})$, от соотношения d/D и температуры теплоносителя T , К:
 1 – 12,29; 2 – 12,92; 3 – 13,55; 4 – 14,18; 5 – 14,82; 6 – 15,45; 7 – 16,08; 8 – 16,71;
 9 – 17,35; $Q_0 = 57 \text{ м}^3/\text{ч}$

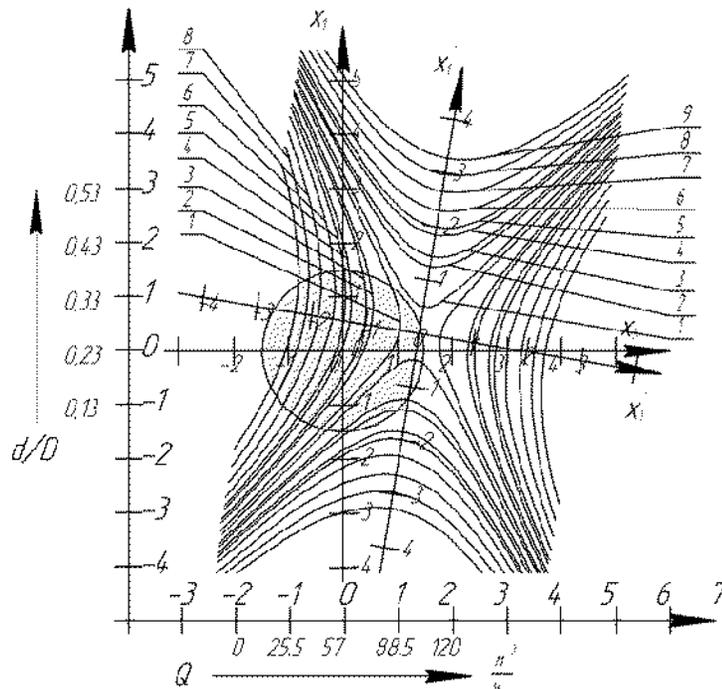


Рис. 4.18. Кривая равных значений напряжения объема сушильной камеры по испаренной влаге, $\text{кг}_{\text{вл.}}/(\text{м}^3\text{ч})$, от соотношения d/D и объема тангенциально подводимого потока теплоносителя $\text{м}^3/\text{ч}$:
 1 – 12,29; 2 – 12,92; 3 – 13,55; 4 – 14,18; 5 – 14,82; 6 – 15,45; 7 – 16,08; 8 – 16,71;
 9 – 17,35; $T = 358 \text{ К}$

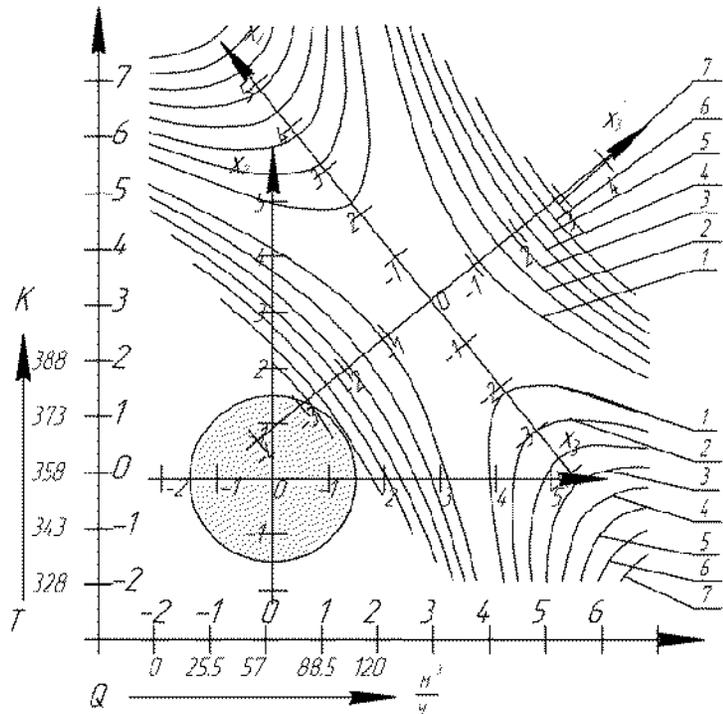


Рис. 4.19. Кривая равных значений напряжения объема сушильной камеры по испаренной влаге, кг_{вп.}/(м³ч), от температуры теплоносителя Т, К и объема тангенциально подвoдимого потока теплоносителя м³/ч:

1 – 12,29; 2 – 12,92; 3 – 13,55; 4 – 14,18; 5 – 14,82; 6 – 15,45; 7 – 16,08; 8 – 16,71; 9 – 17,35; d/D=0.33

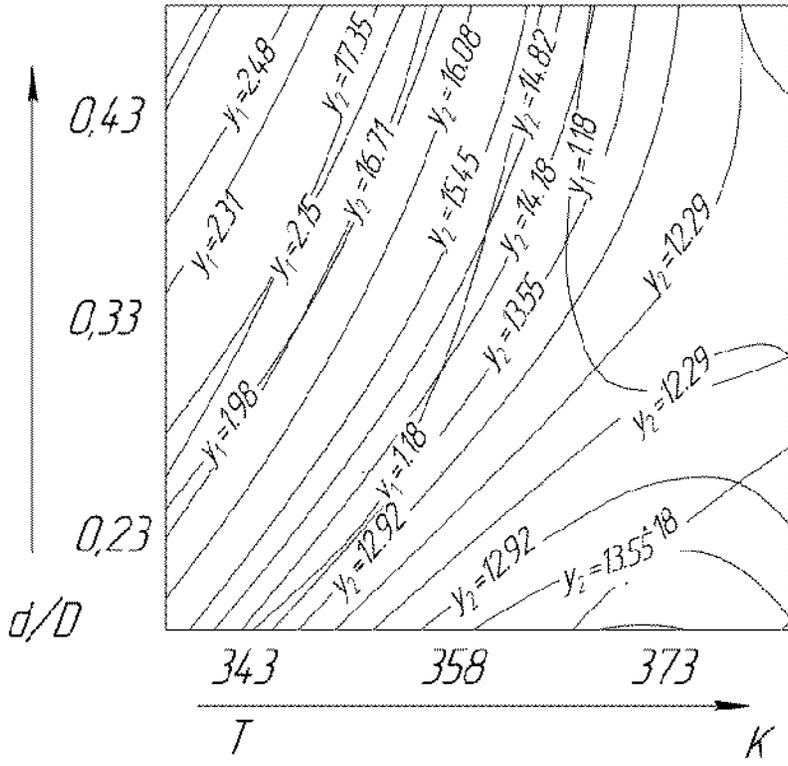


Рис. 4.20. Номограмма для определения удельных энергозатрат (y_1) и напряжения объема сушильной камеры по испаренной влаге (y_2): $Q_в = 57$ м³/ч

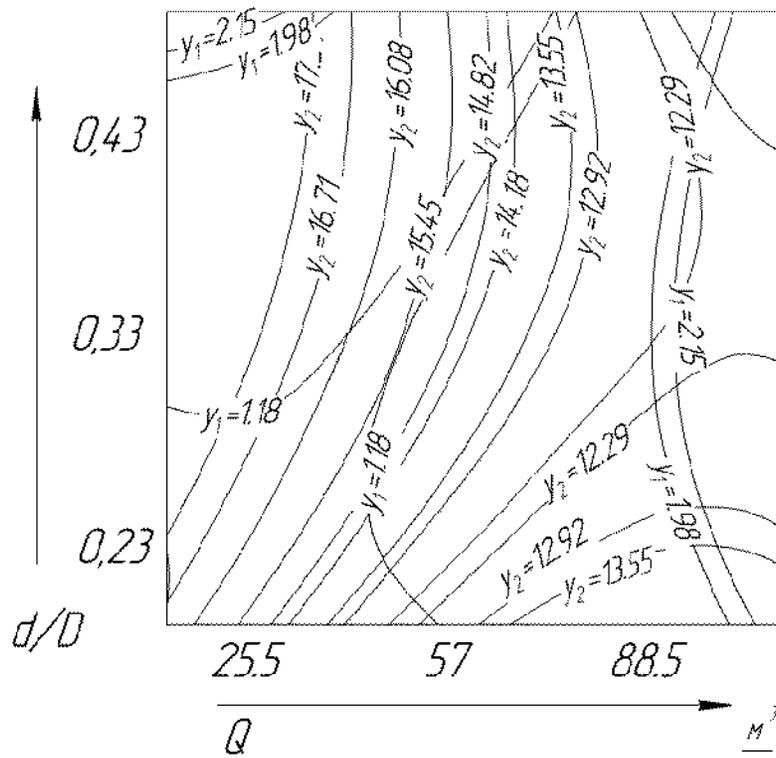


Рис. 4.21. Номограмма для определения удельных энергозатрат (y_1) и напряжения объема сушильной камеры по испаренной влаге (y_2): $T = 358$ К

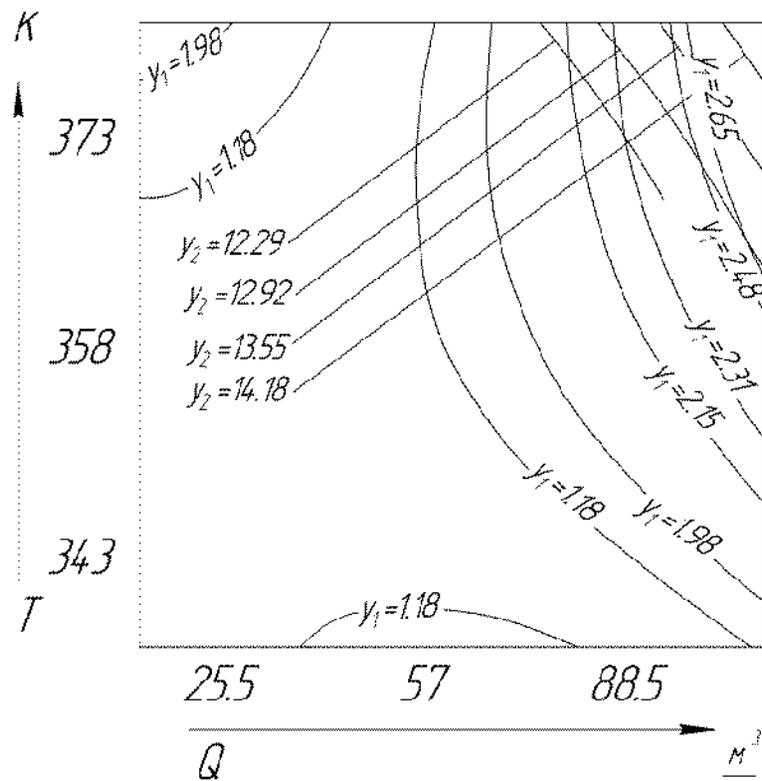


Рис. 4.22. Номограмма для определения удельных энергозатрат (y_1) и напряжения объема сушильной камеры по испаренной влаге (y_2): $d/D = 0.33$

Таблица 4.5

**Оптимальные значения напряжения объема сушильной камеры
по испаренной влаге**

λ	x_1	x_2	x_3	$Y_2,$ кг _{вл} /(м ³ ·ч)
-0,196	-0,011	1,713	1,199	18,164
-0,194	0,141	1,398	1,621	18,196
-0,192	0,139	1,402	1,634	18,215
-0,191	0,137	1,405	1,646	18,234
-0,189	0,135	1,409	1,659	18,253
-0,187	0,134	1,413	1,672	18,272
-0,185	0,132	1,416	1,685	18,292
-0,183	0,130	1,420	1,699	18,312
-0,182	0,128	1,423	1,712	18,332
-0,180	0,127	1,427	1,726	18,353

В интервале изменения $\lambda \in [-0,196; -0,180]$ значение независимых переменных x_i лежали в следующих диапазонах: $x_1 = 0,329...0,344$; $x_2 = 360...384$ К; $x_3 = 94,7...110,5$ м³/ч. При таких значениях параметров скорость влагопоглощения составляла $y_2 = 18,164...18,353$ кг_{вл}/(м³·ч). Отмеченные интервалы изменения независимых переменных для параметра оптимизации y_2 следует признать за оптимальные.

В табл. 4.6 сведены выбранные оптимальные интервалы изменения параметров x_i для всех исследуемых выходных факторов.

Таблица 4.6

Оптимальные интервалы параметров

y	x1,		x2, К		x3, м ³ /ч	
	min	max	min	max	min	max
y1	0,497	0,5	381	382,5	70,8	71,5
y2	0,343	344	378,7	389,6	18,196	18,272

Согласно критерия оптимизации для принятия окончательного решения по выбору оптимальных режимов исследуемого процесса необходимо решить компромиссную задачу, накладывая оптимальные, выделенные в табл. 4.6, интервалы параметров x_i друг на друга.

Параметры x_1 , x_2 и x_3 относительно критерия оптимизации y_1 – удельные

энергозатраты, вступает в конфликт по критерию оптимизации y_2 – напряжение объема сушильной камеры по испаренной влаге.

Рассматривая теперь область допустимых решений $x \in [-1,682; +1,682]$ видим, что критерии y_i конфликтуют. Этот конфликт отображается в определенную область в пространстве критериев $\{y\}$ (рис. 4.23-4.26.), которое называется множеством Парето [56, 131, 136]. Свойства этого множества зависят от свойств критериев оптимизации и области допустимых решений D . При таких условиях решения $x \in D$, которые определяют множество Парето, называются нехудшими или конфликтными решениями. Обозначим множество нехудших решений через M_0 . В общем случае для векторной оптимизации, что имеет место в настоящем исследовании, для решения подобных задач вводится правило, позволяющее оценить решение – безусловный критерий предпочтения (БКП) [22, 136]. Будем считать, что решение x_2 безусловно лучше решения x_1 ($x_2 > x_1$; $>$ в смысле лучше), если $y_i(x_2) \leq y_i(x_1)$ для всех i и хотя бы одно неравенство строгое. Если все $y_i(x_2) = y_i(x_1)$, то решение $x_2 \sim x_1$ (\sim – эквивалентно). То есть, из всего множества D допустимых решений БКП необходимо выделить множество M_0 нехудших конфликтующих между собой, определяющих множество Парето. Другими словами, оператор БКП реализует принцип оптимальности по Парето. В частных случаях для этих целей используются две следующие задачи [136]:

– для выпуклых D и выпуклых $y_i(x)$, $i = \overline{1, s}$

$$Par = \left\{ y(x^*) : \sum_{i=1}^s \alpha_i y_i(x^*) = \min_{x \in D} \sum_{i=1}^s \alpha_i y_i(x) \right\}, \quad (4.13)$$

– для невыпуклых задач

$$Par = \left\{ y(x^*) \max_i \alpha_i y_i(x^*) = \min_{x \in D} \max_i \alpha_i y_i(x); y_i(x) \rightarrow 0 \right\}, \quad (4.14)$$

$$\text{при всех } \alpha \in A = \left\{ (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_s) : \sum_{i=1}^s \alpha_i = 1, \alpha_i > 0 \right\}, \quad (4.15)$$

где A – интервал изменения α .

Результат в виде множества M_0 допускает целое множество решений.

Естественно предположить, что окончательные решения следует искать среди элементов множества M_0 . Поэтому актуальной задачей является сужение множества M_0 , выдача для оценки специалистам ограниченного числа решений. Естественно, сужение приводит к потере информации о множестве M_0 и только ценой этих потерь можно его описать. Наиболее простым способом в решении указанной проблемы является покрытие множества M_0 сетью с некоторым шагом по критериям с тем, чтобы в каждом полученном разбишкой гиперпараллелепипеде оставить по одному элементу множества M_0 [130]. Более общим является использование алгоритмов распознавания образов. Довольно часто для получения одного конкретного решения из множества Парето пользуются сведением задачи векторной оптимизации к скалярной оптимизации путем выделения одного критерия (главного) и переводом остальных в разряд ограничений или построения глобального критерия в виде свертки целевых критериев [111].

В настоящей работе использовался весовой метод, идея которого заключается в синтезе скалярного критерия

$$q(x) = q(q_1, q_2, \dots, q_k), \quad (4.16)$$

как функция исходных критериев, причем минимум его соответствует решению многокритериальной задачи. Тогда решение сводится к обычной оптимизации

$$q(x) \rightarrow \min_{\bar{x} \in D} \quad (4.17)$$

Функция $q(x)$ представлена в виде свертки критериев

$$q(\bar{x}) = \sum_{i=1}^k \alpha_i \frac{q_i(\bar{x}) - q_{i \min}}{q_{i \max} - q_{i \min}}, \quad (4.18)$$

где α_i – вес i -го критерия ($0 \leq \alpha_i \leq 1$, $\sum_{i=1}^k \alpha_i = 1$); $q_{i \max}$; $q_{i \min}$ – максимальное и минимальное значение критериев качества $q_i(\bar{x})$.

Множество Парето в данном случае было получено методом \mathcal{F} -преобразования, путем варьирования весового коэффициента α_i в интерва-

ле $[0, 1]$ ($\sum_{i=1}^k \alpha_i = 1$).

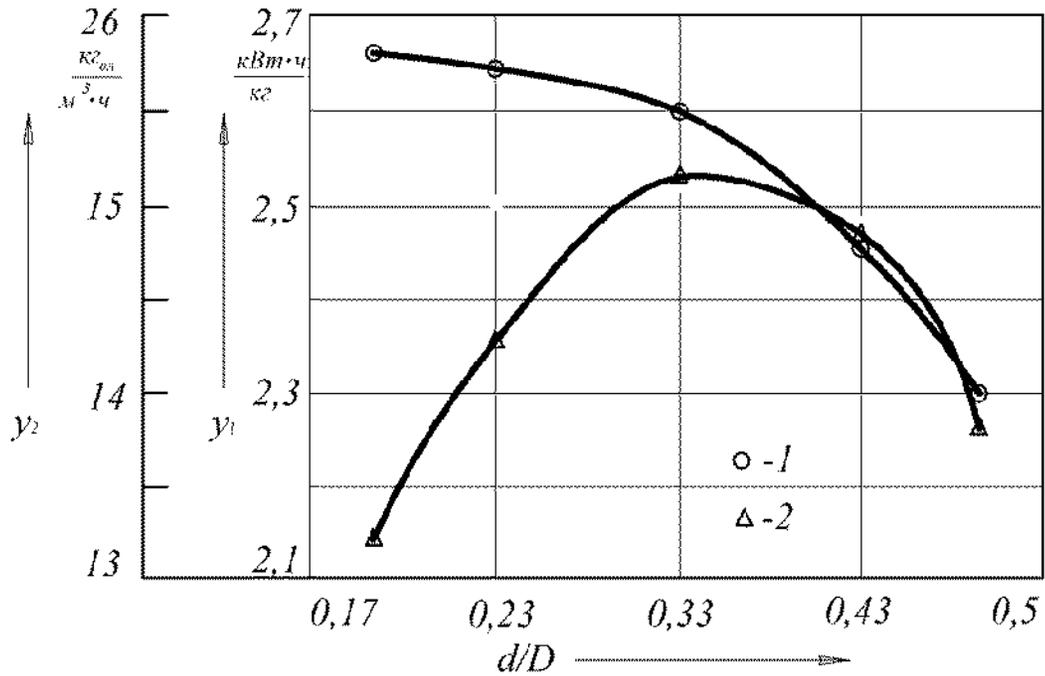


Рис. 4.23. Поведение критериев
1 – $y_1(x_1)$; 2 – $y_2(x_1)$, $x_1 \in [0,17; 0,5]$

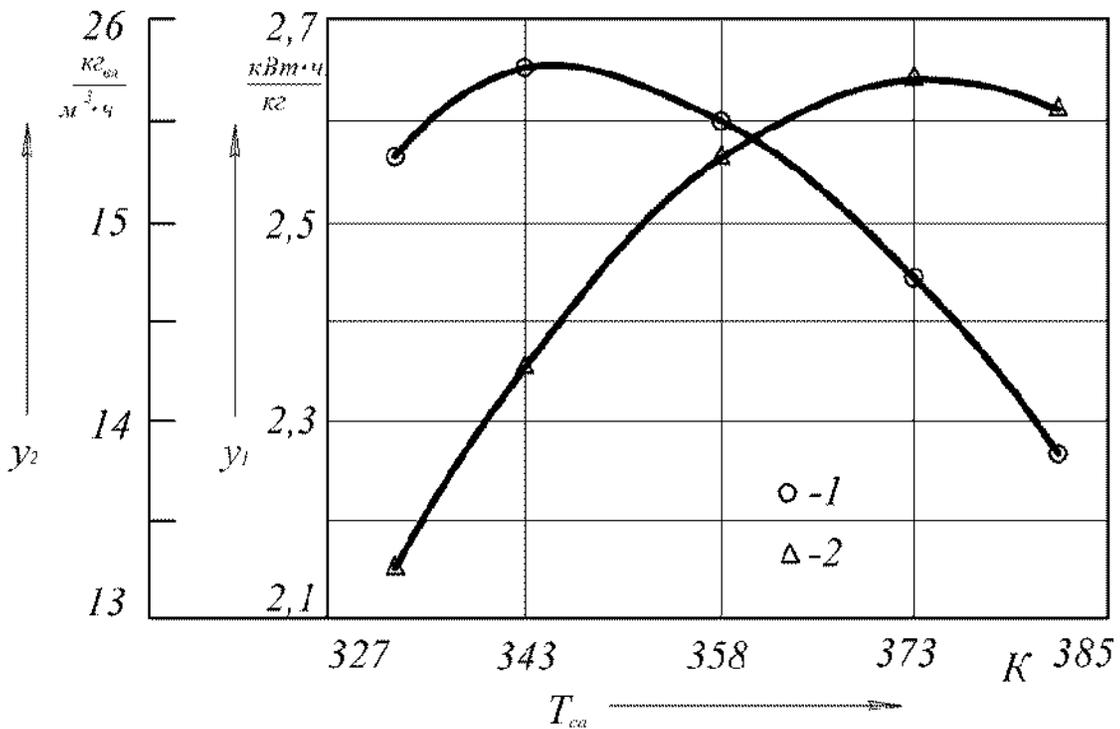


Рис. 4.24. Поведение критериев
1 – $y_1(x_1)$; 2 – $y_2(x_1)$, $x_2 \in [327; 385]$

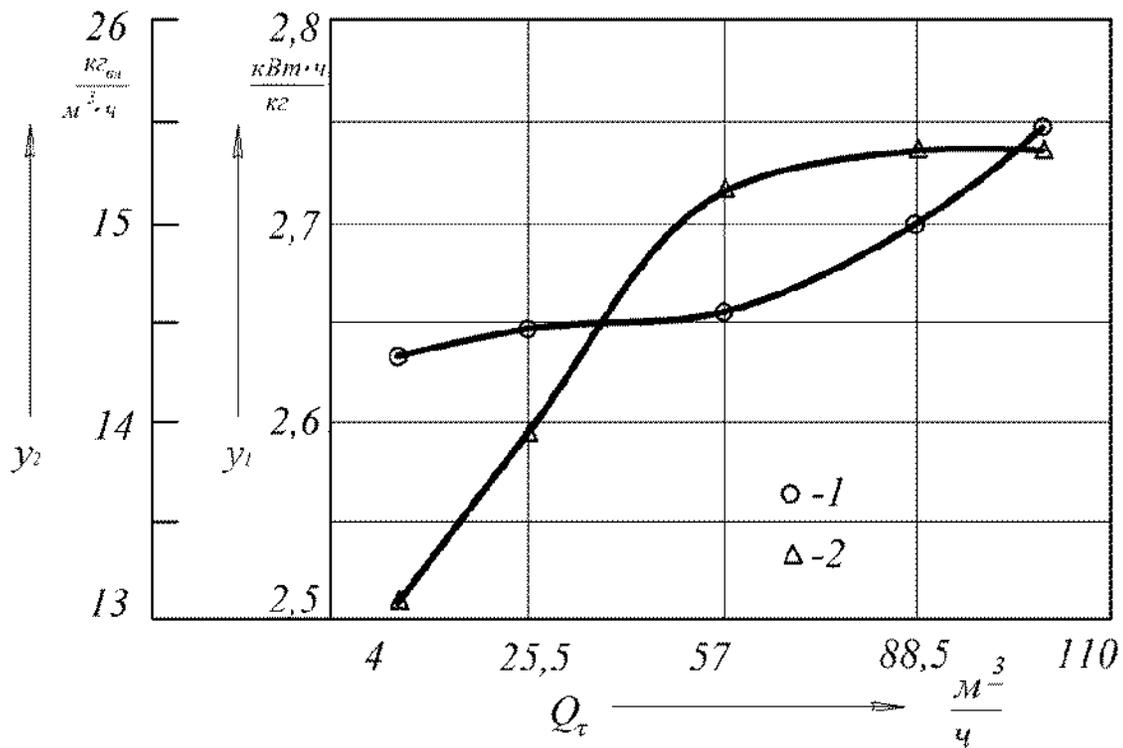


Рис. 4.25. Поведение критериев
1 – $y_1(x_1)$; 2 – $y_2(x_1)$, $x_3 \in [4; 110]$

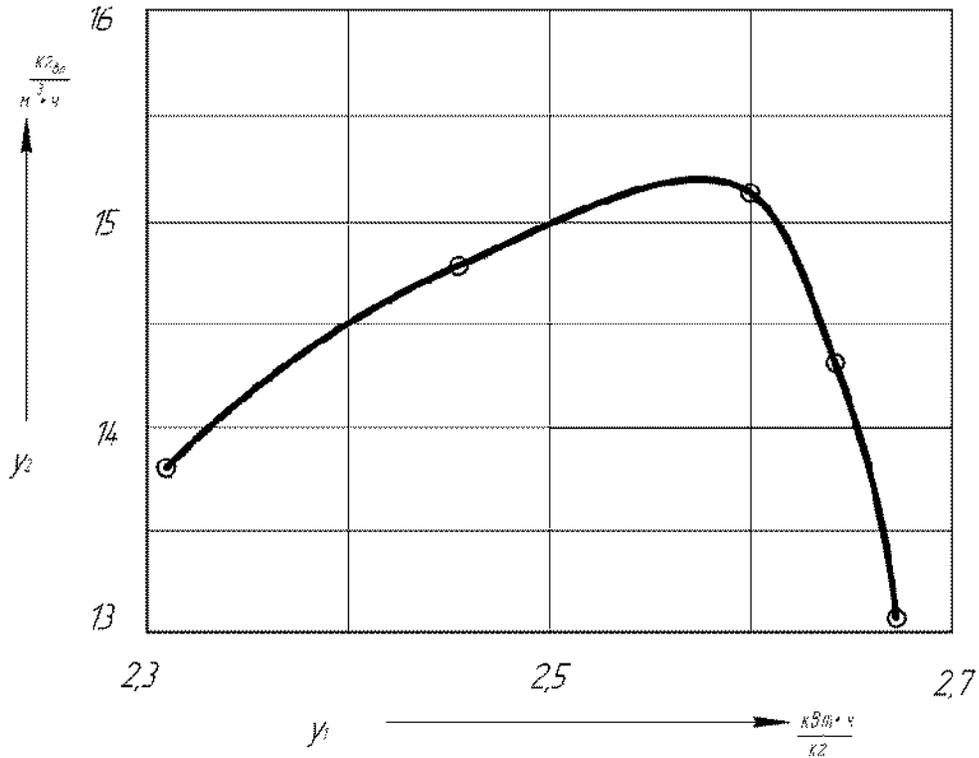


Рис. 4.26. Область Парето критериев
 $y_1(x_1)$ и $y_2(x_1)$

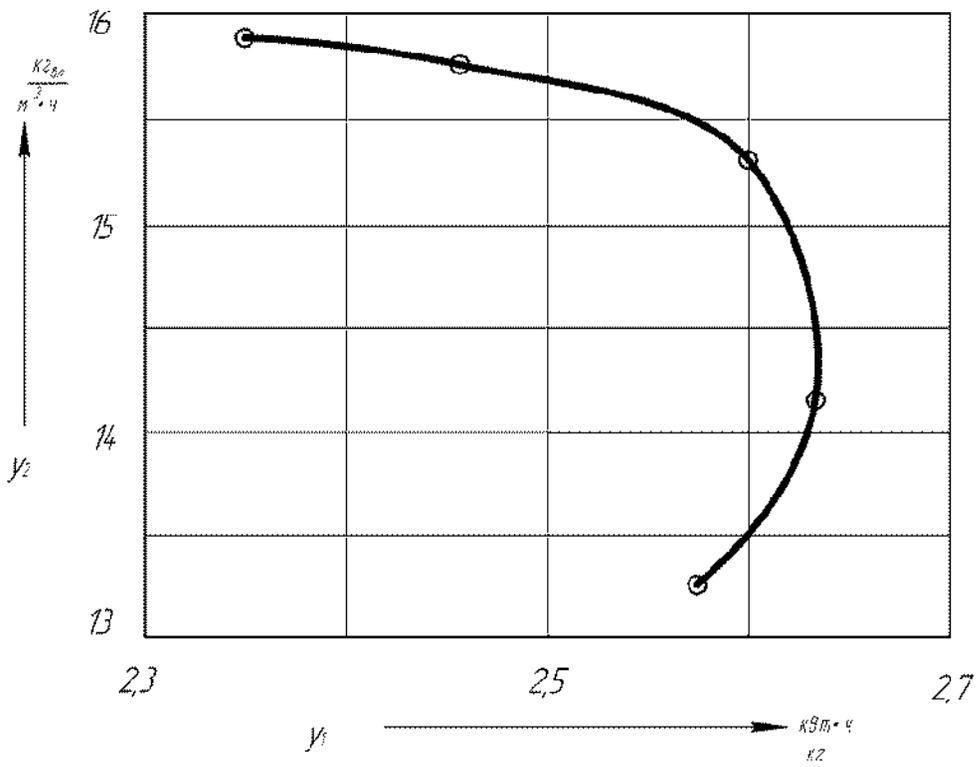


Рис. 4.27. Область Парето критериев $y_1(x_2)$ и $y_2(x_2)$

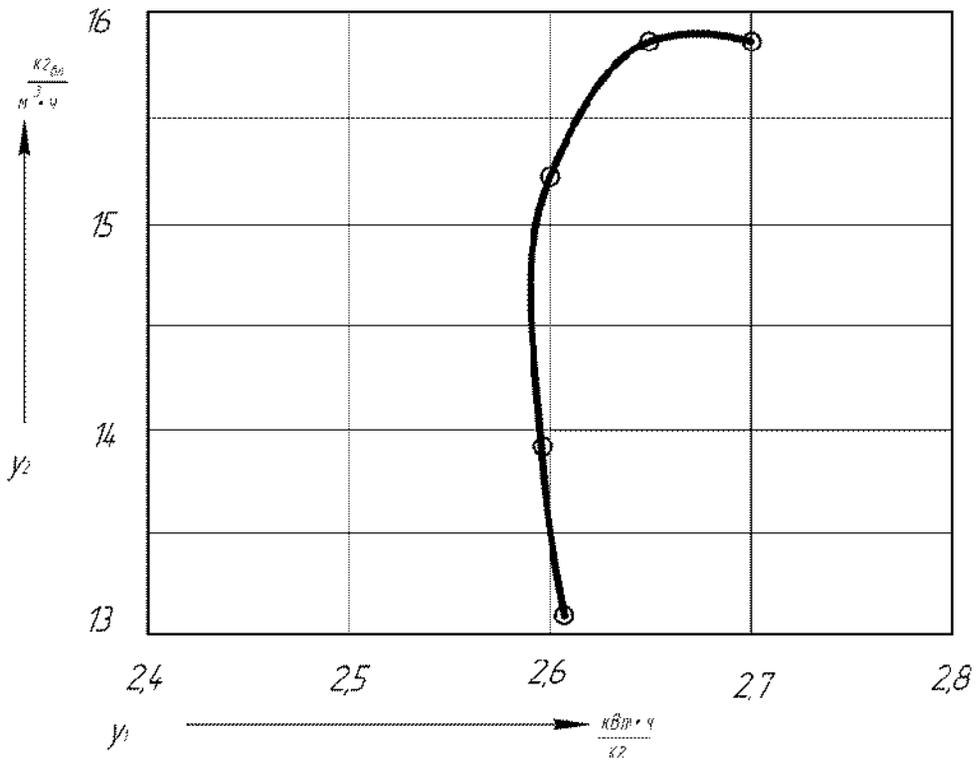


Рис. 4.28. Область Парето критериев $y_1(x_3)$ и $y_2(x_3)$

В результате применения указанного метода были получены субоптимальные интервалы изменения параметров:

$$x_1 = 0,2...0,34; x_2 = 358...373 \text{ К}; x_3 = 25.5...57 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Для проверки правильности полученных результатов был поставлен ряд параллельных экспериментов, полученные результаты попадали в рассчитанные доверительные интервалы по всем критериям качества. При этом среднеквадратичная ошибка не превышала 6 %.

Таким образом, решение задачи с векторным критерием оптимизации осуществлялось в два этапа – это выделение области компромиссов (решений, оптимальных по Парето) и дальнейшее ее сужение на основе некоторой схемы компромисса. Окончательный выбор решения осуществлялся исходя из физического смысла исследуемого процесса в области оптимальных значений выходных факторов. На основании экспериментальных данных и их статистической обработки была получена математическая модель, адекватно описывающая процесс сушки гречихи в аппарате с закрученным потоком теплоносителя. Результаты математической модели и построенные на основании ее решения номограммы будут полезны широкому кругу специалистов, занимающихся сушкой гречихи, а также для расчета и проектирования современных сушильных установок.

ГЛАВА 5. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНЫХ И ПРОЕКТНО-ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

5.1. Организация машинной технологии переработки гречихи

Разработанная технологическая линия работает следующим образом.

Исходное сырье из производственных бункеров 1 взвешивают на автоматических весах 2 и при помощи воздушного насоса 1б по трубопроводу подают в воздушно-ситовые сепараторы 3 для отделения крупных, мелких и легких примесей, а также в камнеотделитель 4 для отбора минеральных примесей. Затем пневмотранспортом, при помощи воздушного насоса 1б и циклона 5 зерно перемещают на последующую очистку.

Для очистки зерна гречихи от трудноотделимых примесей, представляющих собой семена сорных растений, используется крупяной рассев 6. Преимущественно применяется схема ситового сепарирования с использованием сит с круглыми, продолговатыми и треугольными отверстиями в сочетании с фракционированием, чтобы достаточно полно выделять основную массу примесей. Принципиальная направленность схемы заключается во фракционировании зерна на ситах с круглыми отверстиями с последующим просеиванием фракций на ситах с продолговатыми и треугольными отверстиями, размеры которых подбирают исходя из крупности зерна. Так, для мелкой фракции, полученной проходом сит с круглыми отверстиями $\varnothing 4...4,2$ мм, применяют сита с продолговатыми отверстиями размером $2,2...2,4 \times 20$ мм и сита с треугольными отверстиями размером $5...6$ мм. Для крупной фракции, полученной сходом с указанного сита, применяют сита с отверстиями размером соответственно $2,4...2,6 \times 20$ мм и $7...8$ мм. На ситах с продолговатыми отверстиями высеиваются такие примеси, как мелкие зерна пшеницы, ячме-

ня, овса, на ситах с треугольными отверстиями – дикая редька, вика и т.п.

Легкие примеси отделяют в аспираторе 7. Воздушным насосом 16 и циклоном 5 очищенное зерно подается в накопительный бункер 8.

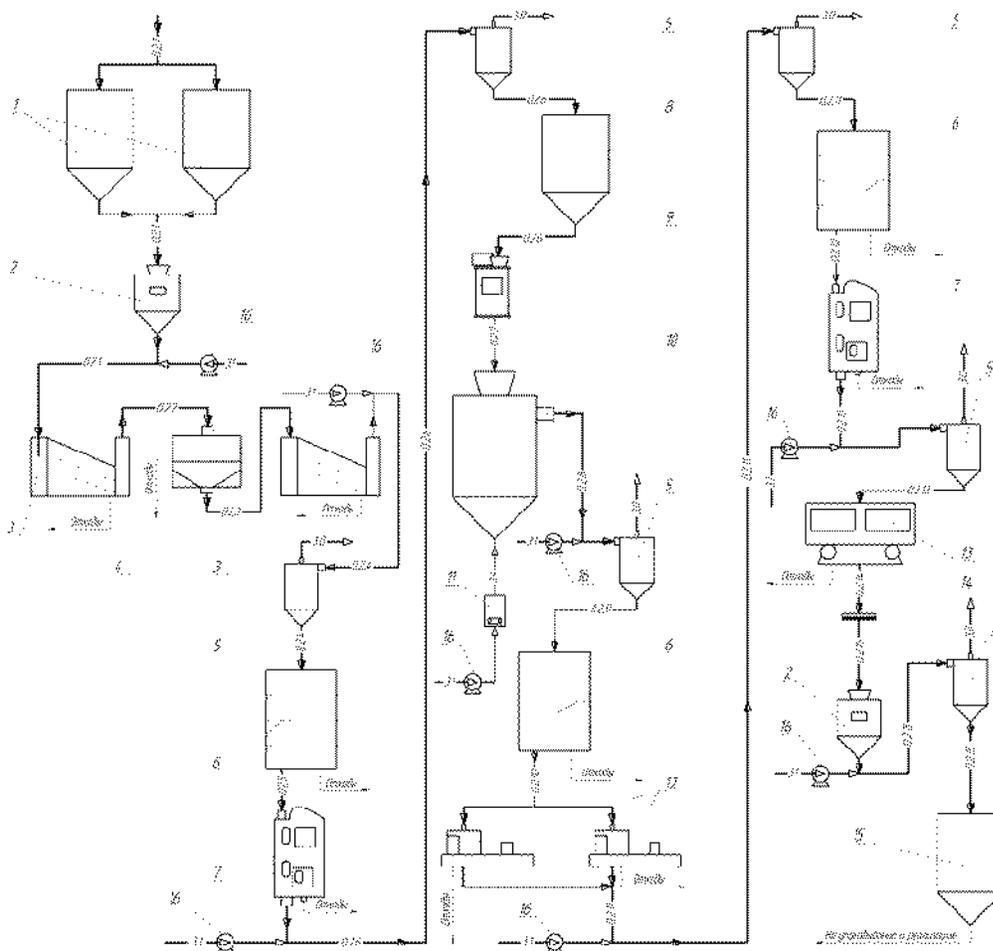


Рис. 5.1. Машинная технология переработки гречихи

Пропариватель периодического действия 9 предназначен для обработки зерна при высоком давлении пара. Пропариватель представляет собой сосуд вместимостью 1 м³, в который подачу зерна и пара повторяют в строгой последовательности по заранее заданному циклу. Гречиху пропаривают при давлении пара 0,25... 0,30 МПа в течение 5 минут. После пропаривания влажность зерна составляет 22 %.

Для сушки пропаренного зерна используют сушилку с закрученными потоками теплоносителя 10, в которую через патрубок для подвода осевого

потока теплоносителя в сушильную камеру подается горячий теплоноситель, проходит через завихритель и закручивается. Через тангенциальный патрубок подается дополнительный поток горячего теплоносителя, который докручивает основной поток теплоносителя до требуемой интенсивности закрутки. После этого исходный влажный дисперсный материал подается в сушильную камеру через патрубок, где интенсивно происходит процесс сушки во взвешенно-закрученном слое, при этом ядро фонтана дисперсного материала вращается вокруг вертикальной оси сушилки, совпадая с направлением движения закручивающего потока, и этим самым достигается равномерное тангенциальное закручивание во взвешенно-закрученном слое. Теплоноситель вместе с частицами материала совершает сложное циркуляционное движение вдоль окружности аппарата, увеличивая при этом свою скорость. Тангенциальная скорость частиц обуславливает возникновение центробежной силы, которая отбрасывает частицы от центра сушильной камеры к ее стенкам, образуя взвешенно-закрученный слой – вращающееся кольцо. При этом процесс сушки протекает в неустановившемся режиме при высоких относительных скоростях частиц материала и теплоносителя. Осевая составляющая скорости закрученного потока по высоте сушильной камеры падает, скорость витания продукта по мере его высыхания – уменьшается. За счет этого продукт по мере его высыхания фонтанирует в закрученном потоке теплоносителя и поднимается на большую высоту по оси сушильной камеры.

Суммарный расход теплоносителя подбирается таким образом, что, достигнув необходимой влажности, продукт удаляется из сушильной камеры, увлеченный отработанным потоком теплоносителя через выводное окно 2 и патрубок 3 для вывода смеси сушеного продукта и отработанного теплоносителя сушильной камеры 1. Конечная влажность готового продукта регулируется скоростью осевого и тангенциальных потоков теплоносителя. За счет изменения тангенциальной составляющей потока теплоносителя можно добиться максимальной равномерности закручивания потока материала и теп-

лоносителя, а меняя осевую составляющую потока теплоносителя, можно регулировать время пребывания продукта в сушильной камере, тем самым значительно интенсифицировать тепломассообменные процессы при прочих равных параметрах сушки.

В случае экстренной остановки сушилки продукт задерживается на решетке 9 и не проваливается в воздуховод

Перед шелушением гречиха делится на 3...6 фракций крупности. Последняя цифра относится к крупным промышленным предприятиям, первая – к агрегатам и предприятиям малой мощности. Чаще всего для калибрования зерна применяют крупяные сита 6.

Разделение на фракции должно происходить с высокой точностью, заключающейся в том, чтобы при высеивании зерна какой-либо фракции в ней оставалось как можно меньше более мелких (не свыше 2,5 %) зерен. При делении зерна на 6 фракций обычно используют следующий набор сит с круглыми отверстиями \varnothing 4,5...4,2...4,0...3,8...3,6...3,3 мм. Сходом с 1-го сита получают 1-ю фракцию зерна, проходом первого и второго сита – 2-ю фракцию и т.д. Разница в размерах нешелушенных зерен во фракциях не превышает 0,2...0,3 мм.

Наряду с указанными выше ситами в отсевах устанавливают сита с треугольными отверстиями, размер которых подбирают в зависимости от крупности фракций. Сходом с этих сит дополнительно отделяют трудноотделимые примеси.

От эффективности системы калибрования зависит содержание нешелушенных зерен, а также некоторых примесей в готовой крупе.

Шелушение зерна гречихи производится в вальцедековых станках 12, вальцы и деки которых покрыты абразивным материалом. В связи с высокой хрупкостью ядра зерно шелушат очень осторожно при сравнительно низкой эффективности шелушения.

Гидротермическая обработка позволяет более интенсивно шелушить зерно, при этом в продуктах шелушения содержание дробленого ядра с

2,5...3,5 % снижается до 1,5... 2,5 %.

Невысокая эффективность шелушения зерна обеспечивает сравнительно малую дробимость ядра. В то же время при такой эффективности шелушения существенно возрастает оборот продукта в системе шелушения. Это не столь существенно для мелких фракций, так как количество зерна в них, как правило, не превышает нескольких процентов.

После этого, зерно пневмотранспортом подается на сортировку. Сортирование продуктов шелушения производят в крупяных отсевах, в которых разделяют нешелушенные зерна, ядрицу, продел с мучкой. Нешелушенные зерна, полученные сходом с сит, размер отверстий которых на 0,2...0,3 мм меньше размеров отверстий сит, сходом с которых получена данная фракция, после отделения из них лузги в аспираторах возвращают на повторное шелушение в тех же вальцедековых станках. Направлять нешелушенные зерна в вальцедековые станки других фракций нельзя.

Сходом с сит с отверстиями размером 1,7 (1,6)×20 мм получают ядрицу с небольшим количеством лузги. Эти продукты с систем переработки всех фракций объединяются и направляются на контроль ядрицы. Проходы этих сит представляют собой смесь продела, мучки и лузги, которая со всех систем объединяется, и направляются на контроль продела.

Контроль крупы осуществляют в отсевах 6, где на ситах с круглыми и треугольными отверстиями выделяют дополнительно примеси, а на ситах с отверстиями размером 1,6×2,0 мм — продел и мучку, направляемые на контроль продела. Ядрицу получают сходом с сита с отверстиями 1,6×20 мм. После провеивания крупы в аспираторах 7 с целью дополнительного выделения примесей ядрицу пропускают через падди-машину 13, а затем через магнитный сепаратор 14.

Готовую крупу ядрицу после взвешивания на весах 2 загружают в силосы 15. Из них обеспечивают отпуск крупы в фасовочные машины для упаковки в тару (на схеме не показано).

Проект линии рассчитан для завода мощностью 30 т/сут. Ниже в таблице

5.1 приведена техническая характеристика предлагаемой линии.

Таблица 5.1

Техническая характеристика линии

Показатель	Ед. измерения	Значение
Количество перерабатываемой гречихи	т/сут	31
Относительная влажность готового продукта	%	14
Относительная влажность зерна гречихи, поступающей на сушку	%	22
Количество получаемого сухого зерна гречихи	т/сут	26

5.2. Разработка перспективных высокоинтенсивных сушильных установок с закрученным потоком теплоносителя

5.2.1. Сушилка с регулируемым закрученным потоком теплоносителя

В результате проведения экспериментальных исследований процесса сушки гречихи были выявлены некоторые особенности, анализ которых показал целесообразность использования такого вида сушки, при котором каждая частица продукта получала бы необходимое количество энергии для фазового превращения содержащейся в ней влаги без образования крупных соединений частиц. На основании этого нами разработана и запатентована оригинальная сушилка с регулируемым закрученным потоком теплоносителя (рис. 5.3)

Сушилка (рис.5.3) состоит из цилиндроконической сушильной камеры 1 с окном 2 и патрубком 3 для вывода смеси сушеного продукта и отработанного теплоносителя и крышкой 5, патрубком 4 для ввода исходного влажного дисперсного материала, патрубка 6 для подачи осевого потока теплоносителя, в котором в нижней части концентрично расположен завихритель 7, а в

его верхней части тангенциально установлен патрубок 8 для подвода дополнительного потока теплоносителя. Удерживающая решетка 9 предназначена для предотвращения попадания частиц материала в воздуховод, в случае экстренной остановки сушильной установки.

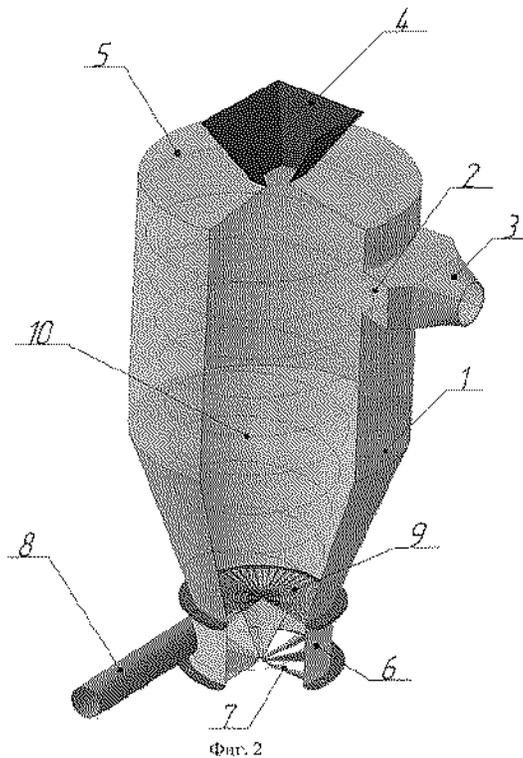


Рис.5.3 – Сушилка с регулируемым закрученным потоком теплоносителя

Траектории закрученных потоков теплоносителя, образованные подводом осевого и тангенциального потоков, показаны линиями 10.

Сушилка с регулируемым закрученным потоком теплоносителя работает следующим образом.

Через патрубок 6 для подвода осевого потока теплоносителя в сушильную камеру 1 подается горячий теплоноситель, проходит через завихритель 7 и закручивается. Через тангенциальный патрубок 8 подается дополнительный поток горячего теплоносителя, который докручивает основной поток

теплоносителя до требуемой интенсивности закрутки. После этого исходный влажный дисперсный материал подается в сушильную камеру 1 через патрубок 4, где интенсивно происходит процесс сушки во взвешенно-закрученном слое, при этом ядро фонтана дисперсного материала вращается вокруг вертикальной оси сушилки, совпадая с направлением движения закручивающего потока, и этим самым достигается равномерное тангенциальное закручивание во взвешенно-закрученном слое. Теплоноситель вместе с частицами материала совершает сложное циркуляционное движение вдоль окружности аппарата, увеличивая при этом свою скорость. Тангенциальная скорость частиц обуславливает возникновение центробежной силы, которая отбрасывает частицы от центра сушильной камеры к ее стенкам, образуя взвешенно-закрученный слой - вращающееся кольцо. При этом процесс сушки протекает в неустановившемся режиме при высоких относительных скоростях частиц материала и теплоносителя. Осевая составляющая скорости закрученного потока по высоте сушильной камеры падает, скорость витания продукта по мере его высыхания - уменьшается. За счет этого продукт по мере его высыхания фонтанирует в закрученном потоке теплоносителя и поднимается на большую высоту по оси сушильной камеры. Суммарный расход теплоносителя подбирается таким образом, что, достигнув необходимой влажности, продукт удаляется из сушильной камеры, увлеченный отработанным потоком теплоносителя через выводное окно 2 и патрубок 3 для вывода смеси сушеного продукта и отработанного теплоносителя сушильной камеры 1. Конечная влажность готового продукта регулируется скоростью осевого и тангенциальных потоков теплоносителя. За счет изменения тангенциальной составляющей потока теплоносителя можно добиться максимальной равномерности закручивания потока материала и теплоносителя, а меняя осевую

составляющую потока теплоносителя, можно регулировать время пребывания продукта в сушильной камере, тем самым значительно интенсифицировать тепломассообменные процессы при прочих равных параметрах сушки.

В случае экстренной остановки сушилки продукт задерживается на решетке 9 и не проваливается в воздуховод.

Таким образом, предлагаемая сушилка с регулируемым закрученным потоком теплоносителя имеет следующие преимущества:

- позволяет получить готовый продукт более высокого качества, за счет организации равномерного закручивания потоков материала и теплоносителя и за счет исключения его контакта с поверхностью тангенциальных воздуховодов;

- благодаря установки завихрителя снижаются энергетические затраты на закручивание потока теплоносителя;

- организация выгрузки готового продукта через окно в патрубок облегчает процесс выгрузки и сбора готового продукта;

- упрощает процессы изготовления и монтажа сушилки, а также позволяет снизить металлоемкость конструкции;

- благодаря возможности регулирования закрученности потока теплоносителя и времени пребывания материала в сушильной камере, сушилка может настраиваться на различные режимы сушки различного рода дисперсных материалов;

- предлагаемая сушилка с регулируемым потоком теплоносителя является универсальной, то есть она может использоваться во всех отраслях промышленности, где необходима сушка дисперсных материалов.

5.2.2. Сушилка со взвешенно-закрученным слоем

Из анализа литературных данных и патентных исследований установлено, что современные промышленные способы сушки зерновых культур развиты в недостаточной степени и поэтому сопровождаются неоправданными энергозатратами.

Как отмечают в своих работах И.Л. Любошиц, Б.С. Сажин, Я. Баранек [78, 127, 128], создание сушильных установок с активными гидродинамическими режимами сводится к разработке таких, где повышение интенсивности теплопереноса и активность гидродинамического режима достигаются при:

- обеспечении увеличения относительных скоростей движения сушильного агента и материала;
- стабильности гидродинамической обстановки во времени по всему объему аппарата;
- минимальном сопротивлении движению потока сушильного агента;

На основании проведенного анализа литературных данных о конструкциях сушилок, относящихся к данному классу и результатов исследования процесса сушки гречихи, нами была разработана сушилка со взвешенно-закрученным слоем.

Сушилка (рис. 5.4) состоит из сушильной камеры 1 с патрубком 3 для ввода исходного материала, разделенной на три секции 2, воздуховодов 4 и коллектора 5 для выгрузки сухого продукта. По оси сушилки в верхней части цилиндрических секций 2 установлены цилиндроконические вставки 6, разделяющие сушильную камеру на зоны. В цилиндрической части каждой цилиндроконической вставки тангенциально установлен патрубок 7 для подвода дополнительного потока сушильного агента. Подача основного потока теплоносителя осуществляется через патрубок 8. Решетка 9 предназначена для предотвращения попадания частиц материала в воздуховод. В верхней

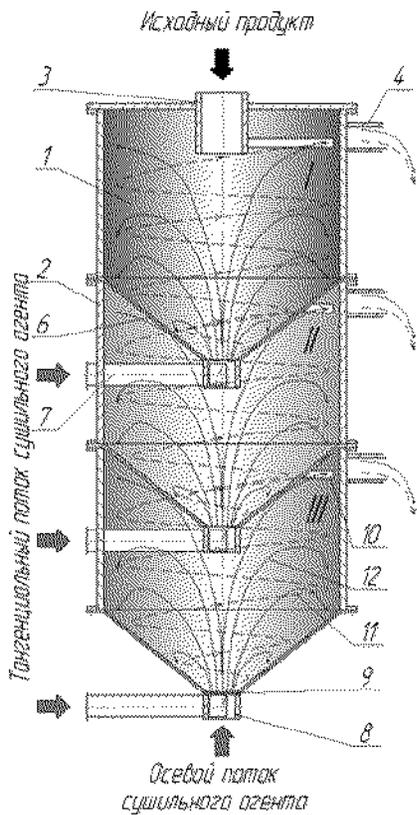


Рис.5.4 – Сушилка со взвешенно-закрученным слоем

пофракционное распределение продукта по зонам сушилки (высоте камеры).

По мере распределения материала по высоте камеры в зоне I сушилки удаляются частицы материала с небольшой массой и размерами, в зоне II – частицы материала со средней массой и размерами частиц, а в зоне III – частицы материала с максимальной массой и сравнительно большими размерами.

части цилиндрических секций 2 выполнены окна 10 для вывода материала и отработанного сушильного агента, представляющие собой две щели.

Траектории закрученных потоков, образованные тангенциальным вводом дополнительного потока сушильного агента, показаны линиями 11, направление перемещения материала в зонах I, II, III сушилки – линиями 12.

Исходный влажный дисперсный материал подается через патрубок 3 в сушильную камеру, где происходит

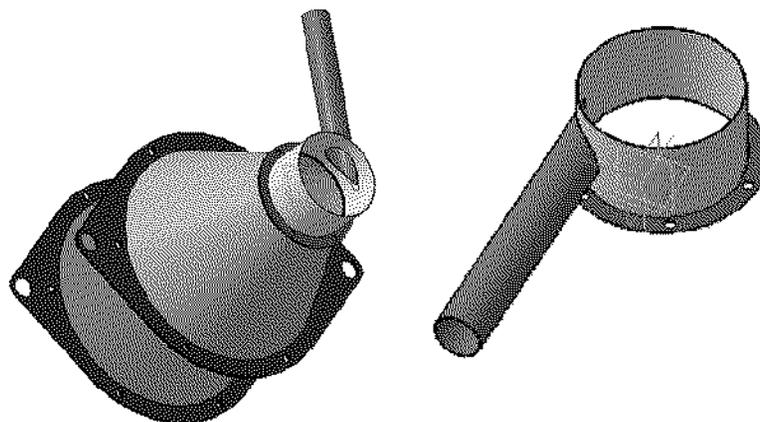


Рис.5.5.– Тангенциальный подвод сушильного агента

В зоне III сушилки частицы материала подхватываются основным и дополнительным потоками сушильного агента, подаваемыми через патрубки 8 и 7 соответственно. Для зоны II поток теплоносителя складывается из обработанного сушильного агента зоны III и дополнительного потока через патрубок 7, а для зоны I – сушильный агент из зоны II и дополнительный поток через патрубок 7. Процесс сушки продолжается в активном гидродинамическом режиме.

В ядре потока зон I, II, III осуществляется фонтанирование слоя материала, при этом за счет установки патрубков 7 в цилиндрической части цилиндрических вставок ядро фонтана вращается вокруг вертикальной оси сушилки, совпадая с направлением движения дополнительного тангенциального потока, и этим самым достигается равномерное тангенциальное закручивание. По мере высыхания частицы высушенного продукта захватываются тангенциальным потоком теплоносителя и уносятся через разгрузочные окна 10 в сборник 4.

Транспортирующей скоростью воздушного потока называют минимальную скорость, которая обеспечивает надежное и устойчивое перемещение материала.

При скорости потока меньше транспортирующей материал перемещаться не может, он падает на дно трубы, образуя в ней завалы. При скорости потока больше транспортирующей надежность транспортирования повышается, но одновременно с этим увеличивается мощность привода пневмотранспортера. Причем мощность привода пропорциональна кубу скорости воздушного потока, поэтому повышение скорости воздушного потока сверх транспортирующей нежелательно.

В вертикальном воздуховоде транспортирование материала возможно при скорости воздушного потока, превышающей скорость витания материала. Скорость витания частиц есть такая скорость восходящего воздушного

потока в вертикальной трубе, при которой частицы оказываются во взвешенном состоянии. При этом вес частицы G уравновешивается силой лобового давления на нее воздушного потока F_{π} :

$$G = F_{\pi} \quad (5.1)$$

Обозначив скорость витания через v_s , м/с, и учтя, что по определению минимальная скорость воздушного потока $v = v_s$, получим

$$v_s = 0,128 \sqrt{\rho_m / (0,02 + a / h)} \quad (5.2)$$

где h – толщина частицы, мм ; a – коэффициент формы частицы: для частиц пластинчатой формы $a = 0,9$, для частиц с лобовым сечением, близким по форме к квадрату или кругу, $a = 1,1$.

Для влажного зерна:

$$v_s = 0,128 \sqrt{1356 / (0,02 + 1,1 / 3)} = 7,58 \text{ м / с}$$

Для сухого зерна:

$$v_s = 0,128 \sqrt{1200 / (0,02 + 1,1 / 3)} = 7,13 \text{ м / с}$$

Т.е. скорость сушильного агента в камере должна превышать $7,13 \text{ м / с}$ но быть менее $7,58 \text{ м / с}$.

Для обеспечения устойчивого режима режима примем среднюю скорость газа в аппарате

$$\bar{v} = (2 \div 3) \cdot v_s = (2 \div 3) \cdot 7,13 = 13 \div 21 \text{ м / с}$$

Дальнейшие расчеты будем проводить именно для этой скорости.

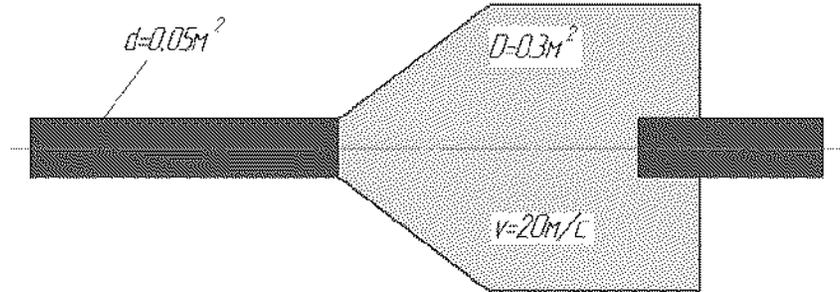
Определение расхода воздуха:

$$L = \bar{v} \cdot F \quad (5.3)$$

$$L = v \cdot \pi \cdot d^2 / 4 = (2 \div 3) \cdot 7,13 \cdot 3,14 \cdot 0,3^2 / 4 = 1 \div 1,5 \text{ м}^3 / \text{ч}$$

Определение местных сопротивлений движения воздуха по сушильной камере:

Расчет будем производить для среднего из исследуемых диаметров конуса $d=100\text{мм}$



$$v_1 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = v_2 \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (5.4)$$

$$v_2 = v_1 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^2 = 20 \cdot \left(\frac{0.05}{0.3}\right)^2 = 20 \cdot 9 = 180 \text{ м/с}$$

$$h_{\text{м.с.}} = \xi_{\text{м.с.}} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (5.5)$$

В каждой секции у нас два основных местных сопротивления это сопротивление расширения и сопротивление резкого сужения: ($\xi_1 = 0.05$ $\xi_2 = 0.8$)

Откуда имеем:

$$h_{\text{м.с.}}^{\text{секции}} = 0.05 \cdot \frac{180^2}{2 \cdot 9.81} + 0.8 \cdot \frac{20^2}{2 \cdot 9.81} = 83 + 16 = 99\text{м}$$

Т.е. приблизительное гидравлическое сопротивление всей сушильной камеры без учета продукта будет

$$h_{\text{м.с.}}^{\text{сушилки}} = h_{\text{м.с.}}^{\text{секции}} \cdot 3 \approx 300\text{м}$$

Рассчитаем минимальное значение давления которое должен будет создать вентилятор

$$H = h_{\text{м.с.}}^{\text{сушилки}} \cdot \rho \cdot g = 300 \cdot 1.22 \cdot 9.81 \approx 3000 \text{ Па}$$

5.3. Повышение эффективности сушки в закрученном потоке теплоносителя

5.3.1. Способ автоматического управления процессом сушки с регулируемым закрученным потоком теплоносителя

Применение современной вычислительной техники для непосредственного управления технологическими процессами сушки в получило меньшее распространение, чем, например, в энергетике или химической промышленности, несмотря на то, что именно микропроцессорная техника в последние годы активно развивается и все больше распространяется на рынке.

В качестве основной и важнейшей функции, которую должен осуществлять процессор в системе управления процессом сушки является функция нахождения и наиболее точного поддержания оптимального технологического режима сушки, а также его оперативной коррекции в условиях случайных возмущений. В большинстве случаев эта функция выполняется при работе процессора в контурах управления технологическими параметрами процесса, т.е. когда оптимизация осуществляется автоматически [54].

В данном случае поиск оптимального режима предлагается осуществлять непосредственно на объекте. Этот метод поиска не требует построения сложной физико-математической модели управляемого процесса. Необходимо лишь экспериментально убедиться в существовании для этого процесса оптимальных условий и составить алгоритм управления в соответствии с заданной программой преобразования получаемой информации о ходе сушки.

Выполнение программы – это последовательное осуществление в определенном порядке вычислительных и логических операций над хранящимися в памяти процессора зависимостями между входными и выходными факторами, а также строгая выборка команд по упорядоченной подаче управляющих воздействий с учетом накладываемых на них ограничений.

Поэтому нами был разработан способ автоматического управления про-

цессом сушки с регулируемым закрученным потоком теплоносителя

На рис. 5.6 представлена схема, реализующая предлагаемый способ автоматического управления процессом сушки с регулируемым закрученным потоком теплоносителя.

Схема содержит бункер исходного сырья 1, сушилку с регулируемым закрученным потоком теплоносителя 2, вентиляторы для подачи сушильного агента 3, 4, калориферы 5, 6, линии подачи исходного влажного материала 7, отвода высушенного материала 8, подвода осевого потока теплоносителя 9, подвода тангенциального потока теплоносителя 10, отвода отработанного теплоносителя 11, датчики влажности 12 и 13 соответственно исходного и высушенного дисперсного материала, расхода сушильного агента 14 и 15 соответственно осевого и тангенциального теплоносителя, расхода 16 и 17 влажного и высушенного материала, влагосодержания исходного теплоносителя 18 и 19, влагосодержания отработанного сушильного агента 20, температуры теплоносителя 21 и 22, исходного влажного дисперсного материала 23, потребляемой мощности калориферов 24,25 и вентиляторов 26, 27, исполнительные механизмы 28-32 (а, б, в, г, д, е, ж, з, и, й, к, л, м, н, о, п – входные каналы управления, d, f, g, h, i – выходные каналы управления), микропроцессор 33.

Способ сушки осуществляется следующим образом.

Влажный дисперсный материал подают в приемный бункер 1, далее дозатором 28 подается в сушилку с закрученным потоком теплоносителя 2. Информация о расходе, температуре и влажности влажного дисперсного материала в линии 7 с помощью датчиков 12, 16, 23 передается в микропроцессор 33, который по заложенному в него алгоритму в зависимости от количества влаги и тепла, содержащихся в исходном влажном дисперсном материале, подаваемом на сушку, устанавливает температурный режим и режим по-

дачи теплоносителя на входе в сушилку посредством вентиляторов 3,4 и калориферов 5, 6.

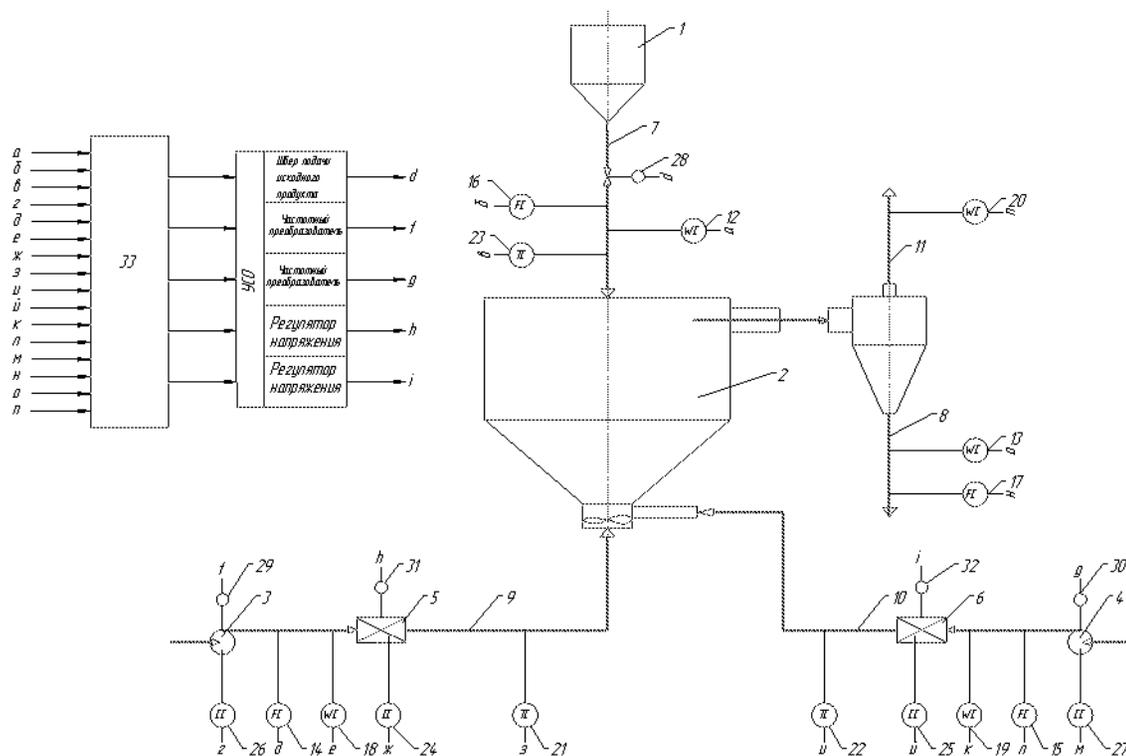


Рис 5.6 – Схема автоматического управления сушилки с закрученным потоком

В ходе процесса сушки дисперсного материала в закрученном потоке теплоносителя с помощью оперативной информации с датчиков влажности исходного дисперсного материала 12 и высушенного 13 измеряют текущее значение влажности исходного дисперсного материала и материала высушенного, по которому осуществляют коррекцию режимов процесса сушки по трем уровням. За счет этого значительно снижается инерционность управления, т.е. сужается интервал времени с момента получения информации о ходе сушки до подачи управляющего воздействия на исполнительные механизмы регулирования. При этом повышается чувствительность системы управления процессом на случайные возмущения со стороны работы оборудования, большую часть которых удается полностью компенсировать, т.е. повышается точность и надежность управления процессом сушки.

Первый уровень. При отклонении текущего значения влагосодержания высушенного дисперсного материала от заданного микропроцессор 33 оперативно вычисляет необходимые изменения расхода и температуры подводимого осевого потока теплоносителя в линии 9 и осуществляет его коррекцию по средствам исполнительных механизмов 29 и 31, изменяющих мощность вентилятора и калорифера соответственно.

Если изменения расхода и температуры потока теплоносителя в осевом направлении не обеспечивают требуемой влажности, то коррекцию режимов сушки осуществляют по второму уровню.

Второй уровень предусматривает тонкую регулировку расхода и температуры подводимого тангенциально потока теплоносителя в линии 10 и осуществляет его коррекцию по средствам исполнительных механизмов 30 и 32, изменяющих мощность вентилятора и калорифера соответственно

Если изменения расхода и температуры потока теплоносителя в тангенциальном направлении не обеспечивают требуемой влажности, то коррекцию режимов сушки осуществляют по третьему уровню.

Третий уровень управления предусматривает достижение заданной влажности высушиваемого дисперсного материала путем регулирования количества подаваемого на сушку исходного дисперсного материала по средствам исполнительного механизма 28.

Информация о расходе материально-энергетических ресурсов, фиксируемая с помощью датчиков 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27 передается в микропроцессор 33, который по заложенному в него алгоритму исходя из условия материального и теплового балансов, определяет наиболее оптимальные режимы управления.

Предлагаемый способ может быть реализован при сушке дисперсных

материалов в экспериментальной установке, сконструированной и изготовленной в Воронежском государственном университете инженерных технологий [Патент №2480693 Россия, МКП 7 F26B 17/10. Сушилка с регулируемым закрученным потоком теплоносителя [Текст] / Антипов С.Т., Журавлев А.В., Казарцев Д.А., Баранов А.Ю. Воронеж, гос. технол. акад. - №2011113204/6; заявл. 05.04.2011; опубл. 27.04.2012, Бюл. 12].

Таким образом, предлагаемый способ автоматического управления процессом сушки с регулируемым закрученным потоком теплоносителя позволяет:

- позволяет получить высушенный дисперсный материал высокого качества за счет оптимизации режимных параметров процесса сушки дисперсного материала в закрученном потоке теплоносителя;

- обеспечить многоканальное управление по трем уровням, что позволяет повысить точность и надежность управления в наиболее оптимальных диапазонах изменения режимных параметров, т.е. снизить инерционность управления;

- повысить энергетическую эффективность процесса сушки с регулируемым закрученным потоком теплоносителя, варьируя величиной теплоэнергетических ресурсов в зависимости от характеристик высушиваемого дисперсного материала и хода процесса, и тем самым снизить затраты на единицу массы высушенного дисперсного материала;

- обеспечивает высокую интенсивность процесса сушки дисперсных материалов;

5.3.2. Способ автоматического управления процессом сушки дисперсных материалов с рециркуляцией теплоносителя в аппаратах с активной гидродинамикой

В связи с жесткими санитарными требованиями к нормам выброса в атмосферу с каждым годом все большее значение приобретает сушка в замкнутом цикле. Применение теплообменников, в которых теплоноситель можно нагреть до высокой температуры, делает этот способ экономически целесообразным в ряде случаев и для много тоннажных производств.

Поэтому на основании литературных данных и проведенных экспериментов, нами был разработан и запатентован способ автоматического управления процессом сушки дисперстных материалов с рециркуляцией теплоносителя в аппаратах с активной гидродинамикой.

Технический результат заключается в повышении качества готового материала, снижении негативного влияния на окружающую среду, снижении удельных энергозатрат, уменьшении потерь материала в процессе сушки.

На рис. 5.7 представлена схема, реализующая предлагаемый способ автоматического управления процессом сушки.

Схема содержит вихревую сушилку 1 для подсушки исходного сырья, дозатор 2, сушилку со взвешенно-закрученным слоем 3, состоящую из трех секций I, II, III; циклоны 4 для очистки отработанного теплоносителя от готового материала, вентиляторы 5 для подачи сушильного агента; калориферы 6, 7 для нагрева сушильного агента, сборник готового материала 8; линии: подачи исходного влажного материала 9, подвода атмосферного воздуха 10, подвода тангенциального потока теплоносителя к I секции 11, подвода тангенциального потока теплоносителя ко II секции 12, подвода тангенциального потока теплоносителя к III секции 13, подвода осевого потока теплоносителя 14, отвода высушенного материала из I секции 15, отвода высушенного материала из II секции 16, отвода высушенного материала из III секции 17, отвода отработанного теплоносителя из I секции 18, отвода отработанного теплоносителя из II секции 19, отвода отработанного теплоносителя из III

секции 20; датчики: расхода 21, температуры 22 и влажности 23 исходного материала, влажности 24 и температуры 25 воздуха поступающего на нагревание, расхода 26, температуры 27 и влажности 28 тангенциального потока сушильного агента, поступающего в первую секцию сушилки, расхода 29, температуры 30 и влажности 31 тангенциального потока сушильного агента, поступающего во вторую секцию сушилки, расхода 32, температуры 33 и влажности 34 тангенциального потока сушильного агента, поступающего в третью секцию сушилки, расхода 35, температуры 36 и влажности 37 осевого потока сушильного агента, поступающего сушилку, влажности 38 и температуры 39 готового материала, получаемого в первой секции сушилки, влажности 40 и температуры 41 готового материала, получаемого во второй секции сушилки, влажности 42 и температуры 43 готового материала, получаемого в третьей секции сушилки, влажности 44 и температуры 45 отработанного теплоносителя из первой секции сушилки, влажности 46 и температуры 47 отработанного теплоносителя из второй секции сушилки, влажности 48 и температуры 49 отработанного теплоносителя из третьей секции сушилки; исполнительные механизмы 50-59; (а, б, в, г, д, е, ж, з, и, й, к, л, м, н, о, п, р, с, т, у, ф, х, ц, ч, ш, щ, э, ю, я – входные каналы управления, d, f, g, h, i, j, k, l, q, r, s, t, v, w, Y, z – выходные каналы управления), датчик расхода готового материала 60, микропроцессор 61.

Способ сушки осуществляется следующим образом.

Влажный дисперсный продукт подают сначала в вихревую сушилку 1, где подсушивают за счет тепла отработанного теплоносителя, далее дозатором 2 подают в I, II и III зоны сушилки 3 со взвешенно-закрученным слоем. Информация о расходе, температуре и влажности подсушенного материала в линии 9 с помощью датчиков 21, 22, 23 передается в микропроцессор 61, который по заложенному в него алгоритму в зависимости от количества влаги и тепла, содержащихся в исходном влажном продукте, подаваемом на сушку, устанавливает температурный режим и режим подачи теплоносителя на входе в сушилку посредством вентиляторов 5, калориферов 6, 7.

В ходе процесса сушки дисперсного материала во взвешенно-закрученном слое с помощью оперативной информации с датчиков влажности исходного материала 23 и высушенного 38, 40, 42 измеряют текущее значение влажности исходного материала и материала высушенного в каждой из трех секции, по которому осуществляют коррекцию режима управления процессом сушки в каждой секции сушилки. За счет этого значительно повышается качество высушиваемого материала.

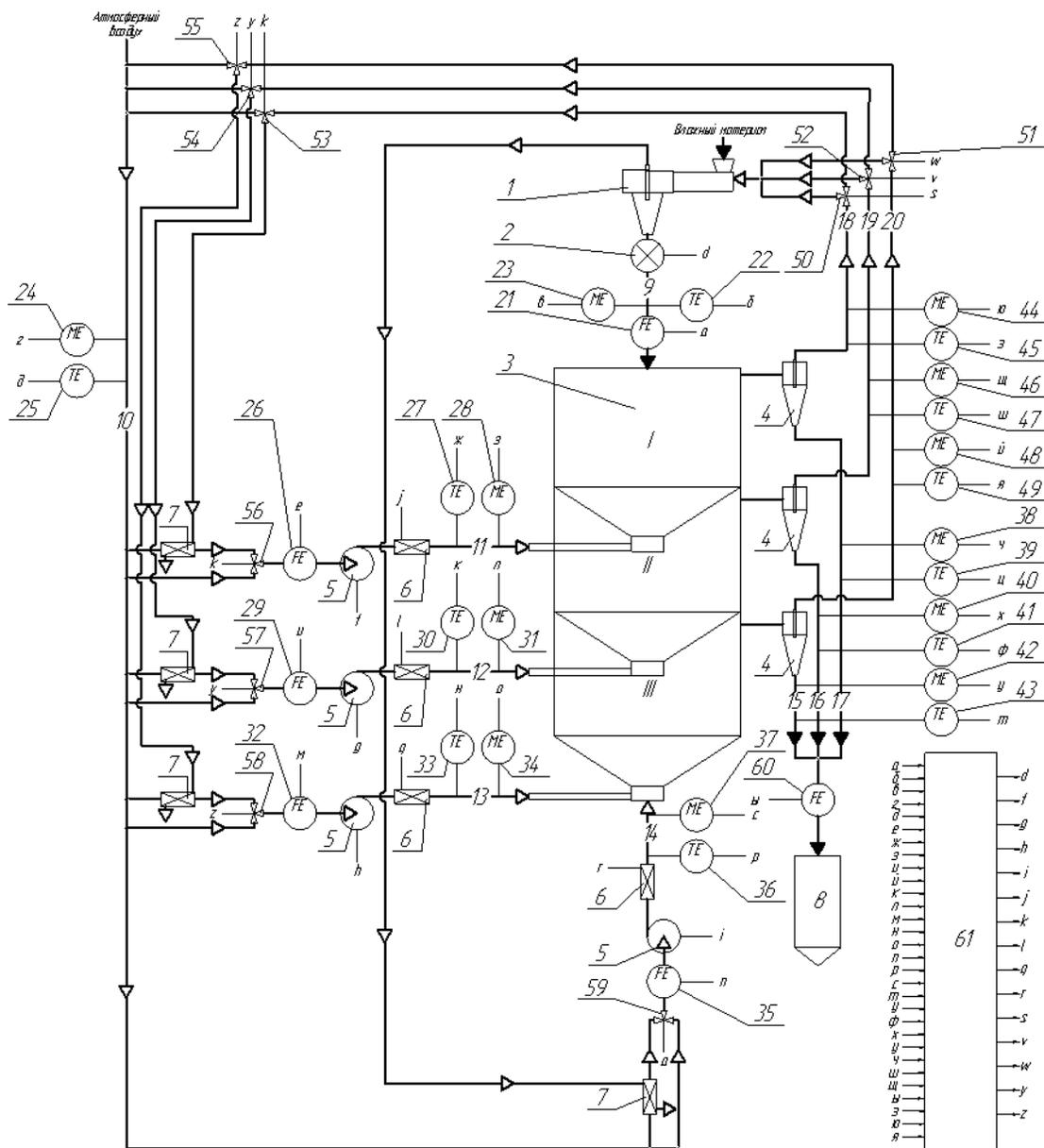


Рис. 5.7. Схема автоматического управления процессом сушки дисперсных материалов с рециркуляцией теплоносителя в аппаратах с активной гидродинамикой

При отклонении текущего значения потока влаги, испаряемого в I секции сушилки, от заданного микропроцессор 61 вычисляет необходимое изменение температуры тангенциально подводимого потока теплоносителя к I секции и осуществляет его коррекцию посредством калорифера 6 установленного в линии 11. Если требуемая влажность не достигается микропроцессор 61 вычисляет необходимое изменение расхода тангенциально подводимого потока теплоносителя к I секции и осуществляет его коррекцию посредством вентилятора 5, установленного в линии 11.

При отклонении текущего значения потока влаги, испаряемого во II секции сушилки, от заданного микропроцессор 60 вычисляет необходимое изменение температуры тангенциально подводимого потока теплоносителя ко II секции и осуществляет его коррекцию посредством калорифера 6 установленного в линии 12. Если требуемая влажность не достигается микропроцессор 61 вычисляет необходимое изменение расхода тангенциально подводимого потока теплоносителя ко II секции и осуществляет его коррекцию посредством вентилятора 5, установленного в линии 12.

При отклонении текущего значения потока влаги, испаряемого в III секции сушилки, от заданного микропроцессор 60 вычисляет необходимое изменение температуры тангенциально подводимого потока теплоносителя к III секции и осуществляет его коррекцию посредством калорифера 6 установленного в 13. Если требуемая влажность не достигается микропроцессор 61 вычисляет необходимое изменение расхода тангенциально подводимого потока теплоносителя к III секции и осуществляет его коррекцию посредством вентилятора 5, установленного в линии 13.

Если изменение температуры и расхода тангенциально подводимого потока теплоносителя не обеспечивает требуемой влажности высушенного материала, то коррекцию режима управления осуществляют коррекцией температуры и расхода осевого потока теплоносителя. Микропроцессор 60 вычисляет необходимое изменение температуры осевого потока теплоносителя и осуществляет его коррекцию посредством калорифера 6, установленного в

линии 14. Если требуемая влажность не достигается микропроцессор 61 вычисляет необходимое изменение расхода осевого потока теплоносителя и осуществляет его коррекцию посредством вентилятора 5, установленного в линии 14.

Отработанный продукт вместе с отработанным теплоносителем удаляются из каждой секции сушилки и поступают на очистку в соответствующие циклоны 4, где происходит их разделение. Готовые продукты полученные в каждой из трех секций по линиям 15, 16 и 17 поступают в сборник 8, при этом с помощью датчиков 38, 40 и 42 микропроцессор 61 получает текущую информацию о влажности готового материала, а с помощью датчиков 39, 41 и 43 получает текущую информацию о температуре готового материала.

С помощью датчиков 44, 46 и 48 микропроцессор 61 получают текущую информацию о влажности отработанных потоков сушильного агента, поступающих из I, II и III секций сушилки соответственно, а с помощью датчиков 45, 47 и 49 микропроцессор 61 получает текущую информацию о температуре отработанных потоков теплоносителя, поступающих из I, II и III секций сушилки соответственно.

С помощью исполнительных механизмов 50, 51 и 52 микропроцессор 61 направляет в вихревую сушилку поток отработанного теплоносителя с минимальной влажностью.

Оставшиеся два потока отработанного теплоносителя микропроцессор 61 в зависимости от их влажности и температуры с помощью исполнительных механизмов 53, 54, 55, 56, 57 и 58 направляет либо на смешение с атмосферным воздухом, поступающим на сушку по линии 10, либо на подогрев воздуха, поступающего на сушку в калориферы 7.

С помощью датчиков расхода исходного материала 21, а также датчиков влажности исходного и готового продуктов микропроцессор 61 определяет количество готового материала (при условии его безуносности) по формуле:

$$Q_2^{\text{г}} = \frac{Q_1(100 - w_1)}{100 - w_2} \quad (5.6)$$

где Q_2^g – количество готового материала получаемого при сушке, при условии его бузуносности, кг/ч;

Q_1 – количество исходного влажного материала, поступающего на сушку, кг/ч;

w_1 – относительная влажность исходного материала, %;

w_2 – относительная влажность готового материала, %.

Фактическое количество готового материала определяется с помощью датчика расхода готового материала 61. Унос материала с отработанным теплоносителем микропроцессор 61 определяет по формуле:

$$U = Q_2^{gy} - Q_2, \quad (5.7)$$

где U – количество материала уносимого с отработанным теплоносителем, кг/ч;

Q_2 – фактическое количество получаемого готового материала, кг/ч.

Если величина U больше допустимой $U_{дон}$, задаваемой в микропроцессор в зависимости от требований к ходу процесса сушки, то микропроцессор вырабатывает сигнал, пропорциональный величине $U - U_{дон}$, который воздействует на исполнительные механизмы вентиляторов 5, снижая подачу теплоносителя. Таким образом, предлагаемая схема автоматического управления позволяет осуществлять контроль за уносом материала вместе с отработанным теплоносителем.

Предлагаемый способ может быть реализован при сушке дисперсных материалов в экспериментальной установке, сконструированной и изготовленной в Воронежском государственном университете инженерных технологий [Патент №2362102 Российская Федерация, МПК7 F 26 B 17/10. Сушилка с активным гид-родинамическим режимом [Текст] / Антипов С. Т., А.В. Журавлев, Черноусов И. М., Баранов А. Ю.; заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. технол. акад. – 2008109396/06; заявл. 11.03.2008; опубл. 20.07.2009, Бюл. № 20].

Таким образом, предлагаемый способ автоматического управления процессом сушки дисперсного материала во взвешенно-закрученном слое позволяет:

- получить готовый продукт более высокого качества за счет независимого контроля процессом сушки в каждой из трех секций;
- осуществлять автоматическое управление процессом сушки дисперсных материалов с системой рециркуляции отработанного теплоносителя;
- осуществить эффективную утилизацию тепла отработанного теплоносителя;
- осуществить автоматический контроль уноса материала во время сушки.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Исследовано влияние влажности гречихи на ее физико-механические, теплофизические и гигротермические свойства, определены энергетические формы связи влаги с материалом.

2. Предложено математическое описание процесса сушки гречихи в аппарате с закрученным потоком теплоносителя, в результате численного моделирования получено полное описание поведения частицы гречихи в аппарате с закрученным потоком теплоносителя, выявлены эффективные конструктивные размеры сушильной камеры.

3. Изучены механизм и основные кинетические закономерности процесса сушки гречихи, в результате чего обоснован выбор технологических режимов проведения процесса сушки гречихи в аппарате с закрученными потоками теплоносителя.

4. В результате статистической обработки экспериментальных данных получены уравнения регрессии, адекватно описывающие процесс сушки гречихи в аппарате с закрученным потоком теплоносителя.

5. Поиск рациональных режимов процесса показал, что для выходных параметров в качестве рациональных должны быть приняты следующие интервалы значений: соотношение диаметров конической части $d/D = 0,2...0,34$; температура сушильного агента $358...373$ К; количество подводимого теплоносителя через тангенциальный патрубок $25.5...57$ м³/ч

6. Разработана оригинальная линия комплексной переработки гречихи.

7. Разработаны оригинальные конструкции высокоинтенсивных сушильных установок с закрученным потоком теплоносителя.

8. Предложены способы автоматического управления процессом сушки дисперсных материалов в вихревом режиме, во взвешенно-закрученном слое и способ автоматического управления процессом сушки дисперсных материалов с рециркуляцией теплоносителя в аппаратах с активной гидродинамикой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А. с. 512352 СССР . Установка для сушки измельченных материалов [Текст] / С. Л. Яровой, Л. А. Орлов, А. И. Мыльников. – Заявл. 11.02.74; опубл. 1976, Бюл. № 16.
2. А. с. 520496 СССР . Установка для сушки дисперсных материалов [Текст] / С. Л. Яровой, Л. А. Орлов, В. П. Клочков и др. – Заявл. 23.12.74; опубл. 1976, Бюл. № 25.
3. А. с. 985653 СССР . Пневмогазовая труба-сушилка [Текст] / Б. Г. Лыкин, С. Л. Дубовиков. – Заявл. 21.05.81; опубл. 1982, Бюл. № 48.
4. А. с. 1744389 СССР . Пневмосушилка для дисперсных материалов [Текст] / Ю. Н. Горюнов, А. С. Тимонин, В. И. Муштаев, А. А. Пахомов, Д. А. Корягин, О. М. Медвецкий, В. Н. Родионов. – Заявл. 21.09.89; опубл. 1992, Бюл. № 24.
5. Абрамович, Г. Н. Прикладная газовая динамика. [Текст] / Г. Н. Абрамович. – М. : Наука, 1976. - 888 с.
6. Айнштейн, В. Г. Псевдооживление [Текст] / В. Г. Айнштейн, А. П. Баскаков – М. : Химия, 1991. – 400 с.
7. Алимов, Р. З. Интенсификация конвективного теплообмена в трубах с помощью завихренного двухфазного потока [Текст] / Р. З. Алимов // Изв. АН СССР. ОТН. Энергетика и автоматика. – 1962. – № 1.
8. Алимов, Р. З. Гидравлическое сопротивление и тепло- и массообмен в закрученном потоке [Текст] / Р. З. Алимов // Теплоэнергетика. – 1965. – № 3. – С. 81–85.
9. Архангельский, Ю. С. Сверхвысокочастотные установки для интенсификации технологических процессов [Текст] / Ю. С. Архангельский, И. И. Девяткин. – Саратов : Изд-во Сарат. унив., 1983. - 140 с.
10. Антипов, С. Т. Сушка пивной дробины в аппарате с закрученным потоком фаз [Текст] / С. Т. Антипов, В. Е. Добромиров, А. В. Прибытков; Воронеж. гос. технол. акад. - Воронеж, 2005. - 164 с.

11. Антипов, С. Т. Установки для пофракционной сушки дисперсных материалов [Текст] / С. Т. Антипов, А. В. Прибытков // Техника машиностроения. – 2001. – № 6. – С. 97–101

12. Антипов, С. Т. Влияние полидисперсности материала на гидродинамику сушильного аппарата с закрученным потоком теплоносителя [Текст] / С. Т. Антипов, А. В. Прибытков, А. В. Журавлев // Вестник ВГТУ / Воронеж. гос. техн. унив. Воронеж, 2005. - № 6. - С. 8-13.

13.

14. Аэров, М. Э. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем [Текст] / М. Э. Аэров, О. М. Тодес. – Л. : Химия, 1968. – 512 с.

15. Аэродинамика частицы в вихревой камере спирально-вихревой сушилки [Текст] / А. С. Тимонин, А. А. Пахомов, Т. З. Нгуен, И. В. Пак // Труды МГАХМ. - М. , 1977. – Вып. 2. - С. 55–58.

16. Баумштейн, И. Т. Автоматизация процессов сушки в химической промышленности [Текст] / И. Т. Баумштейн. – М. : Химия, 1970. – 231 с.

17. Бахвалов, Н. С. Численные методы [Текст] / Н. С. Бахвалов. – М. : Бинум, 2010. - 636 с.

18. Боуманс, Г. Эффективная обработка и хранение зерна [Текст] / Г. Боуманс [пер. с англ. под ред. В.И. Дашевского]. – М. : Агропромиздат, 1991. – 607 с.

19. Богатых, С. А. Исследование процессов теплообмена в циклонных аппаратах при охлаждении газа жидкостью [Текст] / С. А. Богатых, Э. А. Реут // Химическое машиностроение. - 1961. – № 6. – С. 21. – 24.

20. Бородин, И. Ф. Эффективность и механизм действия электромагнитного поля сверхвысокой частоты на семена сорняков [Текст] / И. Ф. Бородин, А. П. Маник, Г. А. Шарков // Применение энергии высоких и сверхвысоких частот в технологических процессах с.-х. производства. - Челябинск, 1983. - С. 54-59.

21. Бродянский, В. М. Эксергетический метод и его приложения [Текст] / В. М. Бродянский, В. Фратишер, К. Михалек. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 288 с.
22. Волькенштейн, В. С. Скоростной метод измерения теплофизических характеристик материалов [Текст] / В. С. Волькенштейн. – Минск, 1962. – Т. I. – С. 65–69.
23. Волькенштейн, В. С. Скоростной метод определения теплофизических характеристик материалов [Текст] / В. С. Волькенштейн. – Л. : Энергия, 1971. – 145 с.
24. Войновский, А. А. Оценка эффективности энергопотребления сушильного оборудования [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук [Текст] / Войновский А. А. – М., 2005. –17 с.
25. Вукалович, М. П. Таблица термодинамических свойств воды и водяного пара [Текст] / М. П. Вукалович. – М. : Госэнергоиздат, 1963.
26. Гельперин, Н. И. Основы техники псевдооживления. [Текст] / Н. И. Гельперин, В. Г. Айнштейн, В. Б. Кваша. – М., 1984. – 664 с.
27. Гельперин, Е. И. Аппарат с псевдооживленным слоем материала в поле центробежных сил [Текст] / Е. И. Гельперин, В. Г. Айнштейн, А. В. Зайковский // Химическое машиностроение. 1960. – № 3.
28. Гинзбург, А. С. Основы теории и техники сушки пищевых производств [Текст] / А. С. Гинзбург. – М. : Пищевая пром-сть, 1973. – 528 с.
29. Гинзбург, А. С. Теплофизические характеристики пищевых продуктов [Текст] / А. С. Гинзбург, М. А. Громов, Г. И. Красовская. – М. : Пищевая пром-сть, 1980. – 288 с.
30. Гинзбург, А. С. Сушка пищевых продуктов в кипящем слое [Текст] / А. С. Гинзбург, В. А. Резчиков. – М. : Пищевая пром-сть, 1966. – 196 с.
31. Гинзбург, А. С. Массообменные характеристики пищевых продуктов. [Текст] / А. С. Гинзбург, И. М. Савина. – М. : Пищевая пром-сть, 1982. – 280 с.

32. Гинзбург, А. С. Расчет и проектирование сушильных установок пищевой промышленности [Текст] / А. С. Гинзбург. – М. : Агропромиздат, 1985. – 336 с.

33. Гладкова, Э. С. Применение в технологических процессах циклонного принципа [Текст] / Э. С. Гладкова, Л. М. Сафонов // Изв. вузов. – 1963. – № 10. – С. 150 – 156.

34. Горбис, З. Р. Теплообмен и гидромеханика дисперсных сквозных потоков [Текст] / З. Р. Горбис. – М., 1970. – с.

35. Годунов, С. К. Разностные схемы [Текст] / С. К. Годунов, В. С. Рябенский. – М. : Наука, 1973. – 400 с.

36. Грачев, Ю. П. Моделирование и оптимизация тепло– и массообменных процессов пищевых производств [Текст] / Ю. П. Грачев, А. К. Тубольцев. – М. : Лег. и пищ. пром-сть, 1984. – 215 с.

37. Грачев, Ю. П. Математические методы планирования экспериментов [Текст] / Ю. П. Грачев. – М. : Пищевая пром-сть, 1979. – 199 с.

38. Дакуорт, Р. Б. Вода в пищевых продуктах [Текст] / Р. Б. Дакуорт [пер. с англ.]. – М. : Пищевая пром-сть, 1980. – 386 с.

39. Денисов, Е. Т. Кинетика гомогенных химических реакций [Текст] / Е. Т. Денисов. – М. : Высш. школа, 1978. – 367 с.

40. Дущенко, В. П. Свойства материалов как объектов сушки и методы их исследования [Текст] / В. П. Дущенко // В кн.: Интенсификация тепло- и массопереноса в процессах сушки]. – Киев : Наукова думка, 1979. - С. 84–93.

41. Ермолин, В. К. Применение закрученного потока для интенсификации конвективного теплообмена в условиях внутренней задачи [Текст] / В. К. Ермолин // Известия АН СССР. ОТН. Энерг. и авт. – 1960. – № 1. – С. 55–61.

42. Журавлев, А. В. Сушильная камера с активным гидродинамическим режимом [Текст] / А. В. Журавлев // Сборник научных трудов “Модернизация существующего и разработка новых видов оборудования для пищевой промышленности” / Воронеж. гос. технол. акад. - Воронеж, 2004. – С. 28-30.

43. Журавлев, А. В. Устройство с закрученным потоком теплоносителя для получения сухой послеспиртовой зерновой барды [Текст] / А. В. Журавлев, Ю. Н. Потолова // Научно-техническое творчество студентов вузов: матер. Всерос. смотра-конкурса науч.-техн. творчества студ. вузов «Эврика-2005» / Мин-во образования и науки РФ, Юж.-Рос. гос. техн. унив. (НПИ). – Новочеркасск : ЮРГТУ, 2005. – Ч. 2. – С. 329–331.

44. Зайченко, Ю. П. Исследование операций [Текст] / Ю. П. Зайченко. – Киев : Вища школа, 1979.- 392 с.

45. Интенсификация теплообменных процессов при сушке послеспиртовой барды [Текст] / А. Ф. Цыцаркин, Д. В. Арсеньев, А. В. Кузмичев и др. // Биотехнология: состояние и перспективы развития: тез. докл. 1-го Междунар. Конгр. - М., 2002. – С. 214.

46. Ильясов, С. Г. Физические основы инфракрасного облучения пищевых продуктов [Текст] / С. Г. Ильясов, В. В. Красников. – М. : Пищевая пром-сть, 1978. – 360 с.

47. Исследование форм связи влаги в семенах амаранта сорта Ультра методом дифференциально-термического анализа [Текст] / С.Т. Антипов, А.В. Журавлев, И.В. Кузнецова, И.М. Черноусов, А.Ю. Баранов // Хранение и переработка сельхозсырья. 2010. № 8. С. 40-41.

48. Исследование кинетики сушки гречихи в сушилке с закрученными потоками теплоносителя [Текст] / С. Т. Антипов, А.В. Журавлев, А. В. Бородкина, А. Ю. Баранов// Научно - теоретический журнал «Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий», Сер. : Процессы и аппараты пищевых производств. - 2014. – № 1. - С. 43-45

49. Исследование форм связи влаги гречихи методом термического анализа [Текст] / С. Т. Антипов, А.В. Журавлев, А. В. Бородкина, А. Ю. Баранов // Научно - теоретический журнал «Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий», Сер. : Процессы и аппараты пищевых производств. - 2013. – № 2. - С. 25-28.

50. Калиткин Н. Н. Численные методы [Текст] / Н. Н. Калиткин. – М. : Наука, 1978. – 512 с.
51. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии [Текст] / А. Г. Касаткин. – М. : Химия, 1971.–784 с.
52. Карман, Т. Вводные замечания по вопросу о турбулентности [Текст] / Т. Карман // В сб.: Проблемы турбулентности космической аэродинамики. – М., 1953. – с.
53. Калишевский, Л. А. Циклонные топки [Текст] / Л. А. Калишевский, Б. Д. Кацпельсон, Г. Ф. Кнорре и др. М., 1958. – С. 216.
54. Калишевский, Л. А. Исследование структуры топочного процесса в горизонтальной циклонной топке [Текст] / Л. А. Калишевский, В. И. Хвостов. Третье Всесоюзное совещание по теории горения. – М., 1960. – Т.2. – С.
55. Кириллин, В. А. Техническая термодинамика [Текст] / В. А. Кириллин, В. В. Сычев, А. Е. Шейндлин. – М. : Энергия, 1974. – с.
56. Крищенко, В. П. Ближняя инфракрасная спектроскопия [Текст] /В. П. Крищенко. – М., 1997.- 638 с.
57. Кришер, О. Научные основы техники сушки [Текст] / О. Кришер. – М. : ИЛ, 1974. - 540 с.
58. Кисельников, В. Н. Комбинированная сушка сыпучих термочувствительных материалов во взвешенном состоянии [Текст] / В. Н. Кисельников, В. В. Вилков, В. С. Романков // Техника сушки во взвешенном слое. – 1966. - Вып.2. – С.
59. Кутепов, А. М. Вихревые процессы для модификации дисперсных систем [Текст] / А. М. Кутепов, А. С. Латкин. – М. : Наука, 1999. – 250 с.
60. Куцакова, В. Е. Интенсификация тепло– массообмена при сушке пищевых продуктов [Текст] / В. Е. Куцакова, А. Н. Богатырев. – М. : Агропромиздат, 1987. – 236 с.
61. Ларичев, О. И. Теория и методы принятия решений, а также Хроника событий в Волшебных странах [Текст] : Учебник / О. И. Ларичев. - М. : Логос, 2000. – 296 с.

62. Лебедев, П. Б. Расчет и проектирование сушильных установок [Текст] / П.Б. Лебедев. - М. : Госэнергоиздат, 1963. – с.
63. Лыков, А. В. Теория теплопроводности [Текст] / А. В. Лыков. – М. : Высшая школа, 1967.–600 с.
64. Лыков, А. В. Теория сушки [Текст] / А. В. Лыков. – М. : Энергия, 1968. – 470 с.
65. Любошиц, И. Л. Сушка дисперсных термочувствительных материалов [Текст] / И. С. Любошиц, Л. С. Слободкин, И. Ф. Пикус. – Минск : Наука и Техника, 1969. – 214 с.
66. Методические указания по определению и обнаружению содержания общей ртути в пищевых продуктах методом беспламенной атомной абсорбции [Текст]: МУ 5178-90. – М., 1990. – с.
67. Методы определения микроколичеств пестицидов в продуктах питания, комах и внешней среде [Текст] : справочник: в 2 т. М. : ВО «Колос», 1992. - Т. 2, -М. : Агропромиздат, 1992. – с.
68. Михайлов Ю. А. [Текст] / Ю. А. Михайлов // Всесоюзное научно-техническое совещание по интенсификации процессов и улучшению качества материалов при сушке в основных отраслях промышленности и сельском хозяйстве (Секция Энергетическая). - М. : Профиздат, 1958. - с.
69. Михеев, М. А. Основы теплопередачи [Текст] / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – М. : Энергия, 1973. – 317 с.
70. Муштаев, В. И. Сушка в условиях пневмотранспорта [Текст] / В. И. Муштаев, В. М. Ульянов, А. С. Тимонин. – М. : Химия, 1984. – 232 с.
71. Муштаев, В. И. Сушка дисперсных материалов [Текст] / В. И. Муштаев, В. М. Ульянов. – М. : Химия, 1998. – 352 с.
72. Наканаси, К. Инфракрасные спектры и строение органических соединений [Текст] : практическое руководство / К. Наканаси [пер. с англ.]. – М. : Мир, 1965. – 216 с.

73. Носов, В. С. Гидравлическое сопротивление и теплоотдача пылегазовых потоков [Текст] / В. С. Носов, Н. И. Сыромятников // Изв. АН СССР. Энергия и транспорт. 1965. – № 3. – С.

74. Носов, В. С. Исследование теплоотдачи полидисперсного пылегазового потока в вертикальном канале [Текст] / В. С. Носов, Н. И. Сыромятников // Изв. вузов. Энергетика. - 1964. – № 12. – С.

75. Опыт промышленного внедрения комбинированных циклонных сушилок [Текст] / Р. М. Кузнецова, А. В. Скурский, В. С. Сажин. Техника сушки во взвешенном слое. – М., 1966: Вып. 2. – С.

76. Осипова, В. А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена [Текст] / В. А. Осипова. – М. : Энергия, 1979. – 320 с.

77. Пат. 2182297 Российская Федерация, МПК⁷ F 26 В 17 / 10. Сушилка с активной гидродинамикой и пофракционной обработкой материала [Текст] / Антипов С. Т., Шахов С. В., Ряховский Ю. В., Прибытков А. В.; заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. технол. акад. – № 2000125645 / 06; заявл. 11.10.2000; опубл. 10.05.2002, Бюл. 13.

78. Пат. 2182298 Российская Федерация, МПК⁷ F 26 В 17 / 10. Сушилка фонтанирующего слоя [Текст] / Антипов С. Т., Шахов С. В., Ряховский Ю. В., Прибытков А. В.; заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. технол. акад. – № 2001100441 / 06; заявл. 05.01.2001; опубл. 10.05.2002, Бюл. 13.

79. Пат. 2204263 Российская Федерация, МПК⁷ F 26 В 17 / 10, А 23 К 1/06, А 23 L 1/30. Способ получения пищевой биодобавки и сушилка для его осуществления [Текст] / Антипов С. Т., Шахов С. В., Фараджева Е. Д., Прибытков А. В., Кораблин Р. В., Моисеева И. С.; заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. технол. акад. – № 2001131709/13; заявл. 23.11.2001; опубл. 20.05.2003, Бюл. 14.

80. Пат. 4552775 США, НКИ 426/624 [Текст]. - Опубл. 12.11.85.

81. Пат. 2403203 ФРГ, МКИ² A23 К 1 / 06. Verfahren zur verarbeitung von biertreber [Text] / Franz Leiber (ФРГ). – № 2403203.9 – 41; заявл. 23.01.74; опубл. 16.06.79. – 6 с. 2.

82. Пат. 1133 748 Канада, МКИ³ A23 1 / 00. Process for preparing protein from Brewery Waste [Text] / Weaver, L. Robert, Townsley, M. Philip (Канада); Molson Companies Limited (The). (Канада.). – № 334936; заявл. 18.02.79.

83. Пат. 2335717 Российская Федерация, МПК⁷ F 26 В 25/22. Способ автоматического управления процессом сушки дисперсных материалов в вихревом режиме [Текст] / Антипов С. Т., А.В. Журавлев, Черноусов И. М., Баранов А. Ю.; заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. технол. акад. – № 2007113076/06; заявл. 10.04.2007; опубл. 10.10.2008, Бюл. № 28

84. Пат. 2340853 Российская Федерация, МПК⁷ F 26 В 25/22. Способ автоматического управления процессом сушки полидисперсных материалов во взвешенно-закрученном слое [Текст] / Антипов С. Т., А.В. Журавлев, Черноусов И. М., Баранов А. Ю.; заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. технол. акад. – № 2007113078/06; заявл. 10.04.2007; опубл. 10.12.2008, Бюл. № 34

85. Пат. 2263262 Российская Федерация, МПК⁷ F 26 В 17/10. Вихревая сушилка [Текст] / Антипов С. Т., Прибытков А. В., Журавлев А. В.; заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. технол. акад. – № 2004112142; заявл. 20.04.2004; опубл. 27.10.2005, Бюл. 30.

86. Пат. 2350866 Российская Федерация, МПК⁷ F 26 В 25/22. Способ автоматического управления процессом сушки дисперсных материалов с рециркуляцией теплоносителя в аппаратах с активной гидродинамикой [Текст] / Антипов С. Т., А.В. Журавлев, Черноусов И. М., Баранов А. Ю. Журавлев В.В; заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. технол. акад. – 2007149211/06; заявл. 10.12.2008; опубл. 27.03.2009, Бюл. № 32

87. Пат. 2272230 Российская Федерация, МПК⁷ F 26 В 17/10. Сушилка с активной гидродинамикой и пофракционной обработкой материала [Текст] / Антипов С. Т., Прибытков А. В., Журавлев А. В.; заявитель и патентообла-

датель Воронеж. гос. технол. акад. – № 2004130341; заявл. 15.10.2004; опубл. 20.03.2006, Бюл. 8.

88. Пат. 2425311 Российская Федерация, МПК7 F 26 В 17/10. Вихревая сушильная камера для сушки дисперсного материала в закрученном потоке теплоносителя с СВЧ-энергоподводом [Текст] / Антипов С. Т., Казарцев Д. А., Бунин Е. С., Баранов А. Ю., Юрова И. С., Журавлев А. В.; заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. технол. акад. – № 2010115946/06; заявл. 21.04.2010; опубл. 27.07.2011, Бюл. № 21. – 2 с.

89. Пермяков, Б. А. Исследование теплообмена от обогреваемой стенки к пылевоздушному потоку [Текст] / Б. А. Пермяков, В. А. Локшин // Теплоэнергетика. – 1964. – № 9. – с.

90. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий [Текст] / Адлер Ю. П. и [др.] – М. : Наука, 1971. – 278 с.

91. Подиновский, В. В. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач [Текст] / В. В. Подиновский, В. Д. Ногин. – М. : Наука, 1982. – 250 с.

92. Процкий, А. Е. Исследование циклона в качестве сушильного устройства [Текст] / А. Е. Процкий // Изв. вузов. – Энергетика. – 1968. – № 8.

93. Процкий, А. Е. Об относительных скоростях в двухфазном винтовом потоке [Текст] / А. Е. Процкий // Изв. вузов. – Энергетика. – 1965. – № 2.

94. Предельно допустимые остаточные количества пестицидов в кормах для сельскохозяйственных животных [Текст]: утверждены Главным управлением ветеринарии Министерства сельского хозяйства СССР 17.05.77, 03.04.81 № 117-11. – М., 1981. – С.

95. Прибытков, А. В. Исследование процесса сушки пивной дробины в аппарате с закрученным потоком фаз [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук [Текст] / Прибытков А. В. – Воронеж, 2003. – 20 с.

96. Прибытков, А. В. Интенсификация сушильных процессов за счет активизации гидродинамического режима [Текст] / А. В. Прибытков

// Материалы XXXVIII юбилейной отчетной научной конференции за 1999 год: в 3ч. // Воронеж. гос. технол. акад. – Воронеж, 2000. – Ч.2. - С. 29–30.

97. Разумов, Н. Н. Псевдооживление и пневмотранспорт сыпучих сред [Текст] / Н. Н. Разумов. – М. : Химия, 1972. - 240 с.

98. Разработка высокоинтенсивной сушилки с регулируемым закрученным потоком теплоносителя [Текст] / С. Т. Антипов, А.В. Журавлев, А. В. Бородкина, А. Ю. Баранов // Научно - теоретический журнал «Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий», Сер. : Процессы и аппараты пищевых производств. - 2013. – № 4. - С. 47-49

99. Распределение концентрации дисперсного материала в пневмотракте спиральных сушилок [Текст] / А. С. Тимонин, В. И. Муштаев, А. В. Левин, А. А. Пахомов // Тезисы третьей Всесоюзной научно-технической конференции «Химтехника-83». – Ташкент, 1983. –С.

100. Резников, А. Б. Теплотехнические основы циклонных топочных и технологических процессов [Текст] / А. Б. Резников, Б. П. Устименко, В. В. Вышенский. – Алма-Ата : Наука, 1974. – 374 с.

101. Рогов, И. А. Сверхвысокочастотный нагрев пищевых продуктов [Текст] / И. А. Рогов. - М. : Агропромиздат, 1986. – с.

102. Рогов, И. А. Техника сверхвысокочастотного нагрева пищевых продуктов [Текст] / И. А. Рогов, С. В. Некрутман, Г. В. Лысов. – М. : Легкая и пищевая промышленность, 1981.- 297 с.

103. Рогов, И. А. Физические методы обработки пищевых продуктов [Текст] / И. А. Рогов, А. В. Горбатов. – М. : Пищевая промышленность, - 1974.-583 с.

104. Романков, П. Г. Сушка во взвешенном состоянии [Текст] / П. Г. Романков, Н. Б. Рашковская. – Л. : Химия, 1979.- 271 с.

105. Рудинов, Л. П. Статистические методы оптимизации химико-технологических процессов [Текст] / Л. П. Рудинов. – М. : Химия, 1972. – 200 с.

106. Ряховский, Ю. В. Разработка энергосберегающей технологии сушки пищевых волокон [Текст] : дис. ... канд. техн. наук / Ряховский Ю. В. – Воронеж, 2000. – 170 с.

107. Сажин, В. С. Комбинированный сушильный агрегат подсушкой в проходящем псевдооживленном слое и досушкой в циклонной камере [Текст] / В. С. Сажин, И. Ф. Фокин // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1964. – № 6. – С.

108. Сажин, В. С. Техника сушки во взвешенном слое [Текст] / В. С. Сажин, Л. М. Кочетов. – М., 1965. – Вып. 1. – с.

109. Сажин, Б. С. Основы техники сушки [Текст] / Б. С. Сажин. – М. : Химия, 1984. – 320 с.

110. Скурский, А. В. Опыт промышленного освоения сушилок со взвешенным слоем [Текст] / А. В. Скурский, Б. С. Сажин // Химическая промышленность. – 1964. – № 12. – с.

111. Смольский, Б. М. Внешний тепло- и массообмен в процессе конвективной сушки [Текст] / Б. М. Смольский. - Минск : Изд-во Белгоруниверситет им. В.И. Ленина, 1957. – с.

112. Соболев, И. М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями [Текст] / И. М. Соболев, Р. Б. Статников. – М. : Наука, 1981. – 260 с.

113. Сонгин, Р. Г. Численные методы в многоэкземплярных задачах [Текст] / Р. Г. Сонгин. – М. : Наука, 1978.-240 с.

114. Спирально-вихревые аппараты – эффективное оборудование для термообработки дисперсных материалов [Текст] / А. С. Тимонин, Т. З. Нгуен, В. И. Муштаев, А. А. Пахомов // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1997. - № 2 - С. 11–13.

115. Способ автоматического управления процессом сушки дисперсных материалов [Текст] / А.В. Журавлев, И.М. Черноусов, А.Ю. Баранов // Научно - теоретический журнал «Вестник Воронежской государственной техно-

логической академии», Сер. : Процессы и аппараты пищевых производств. - 2008. – № 1. - С. 50-53.

116. Стародубцева, А. И. Практикум по хранению зерна [Текст] / А. И. Стародубцева, В. С. Сергунов. – М. : Агропромиздат, 1987. – 192 с.

117. Сушка угольного флотоконцентрата и других сыпучих материалов в аппарате газоциклонного типа [Текст] / Р. И. Попов, И. Я. Рашкевич, Р. А. Иткин и др. // Кокс и химия. 1964. – № 1. – с.

118. Сушка пищевых растительных материалов [Текст] / Г. К. Филоненко, М. А. Гришин, Я. М. Гольденберг, В. К. Коссек. – М. : Пищевая пром-сть, 1971. – 440 с.

119. . Сушка малоценных продуктов разделки рыб при производстве сухих основ для бульонов, супов и соусов быстрого приготовления[Текст] / Л.В Антипова, Ю.Н. Воронцова, А. Ю. Баранов, Е. В. Буданцев // Научно - теоретический журнал «Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий», Сер. : Процессы и аппараты пищевых производств. - 2012. – № 3. - С. 12-15

120. Сысоев, В. В. Системное моделирование [Текст] / В. В. Сысоев; Воронеж, технол. ин-т. – Воронеж, 1991. – 80 с.

121. Справочник по пыле- и золоулавливанию [Текст] / под ред. М. И. Биргера, А. Ю. Вальдберга и [др.]. – М. : Энергопромиздат, 1983. – 312 с.

122. Темкин, А. Г. [Текст] А.Г. Темкин // Всесоюзное научно-техническое совещание по интенсификации процессов и улучшению качества материалов при сушке в основных отраслях промышленности и сельском хозяйстве (Секция Энергетическая). М. : Профиздат, 1958. – с.

123. Теоретические основы теплотехнических процессов зерноперерабатывающих производств [Текст] : учеб. пособие / Г. Г. Странадко, А. А. Шевцов, Л. И. Лыткина, В. А. Дятлов; Воронеж. гос. технол. акад.– Воронеж : ВГТА, 2005. - 256 с.

124. Теория турбулентных струй [Текст] / Г. Н. Абрамович, А. Т. Гиршович, С. Ю. Крашенинников и др. – М. : Наука, 1984. – 716 с.

125. Термические бимолекулярные реакции в газах [Текст] / В. Н. Кондратьев, Е. Е. Никитин, А. И. Резников, С. Я. Уманский. – М. : Наука, 1976. – 275 с.

126. Тонконогий, А. В. Исследование конвективного теплообмена на моделях циклонных камер [Текст] / А. В. Тонконогий, В. В. Вышинский. // Проблемы теплоэнергетики прикладной теплофизики. – 1964. – Вып. 1. – с.

127. Тонконогий, А. В. Исследование массообмена на моделях циклонных камер [Текст] / А. В. Тонконогий, В. В. Вышинский // Прикладная теплофизика. – Алма-Ата, 1971. – с.

128. Турчак, Л. И. Основы численных методов [Текст] : учеб. пособие / Л. И. Турчак / – М. : Наука Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 320 с.

129. Хиппель, А. Диэлектрики и волны [Текст] / А. Хиппель. – М. : Наука, 1960. – 360 с.

130. Хитрин, Л. В. Применение циклонной топки в установках энерготехнологического использования твердого топлива [Текст] / Л. В. Хитрин, Ю. П. Шелестин // Теплоэнергетика. – 1955. – № 9. – с.

131. Циклонные высокотемпературные гетерогенно протекающие процессы [Текст] / С. И. Вольфович, А. А. Ионасс, И. А. Семененко, А. А. Сидельковский // Журнал прикладной химии, 1966. – Т. 39, Вып. 4. – с.

132. Чудновский, А. Ф. Теплообмен в дисперсных средах [Текст] / А. Ф. Чудновский. – М. : Гостехиздат, 1954. – 444 с.

133. Чудновский, А. Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов [Текст] / А. Ф. Чудновский. – М. : Физматгиз, 1962. – 452 с.

134. Четвериков, Е. А. Использование возможности способа «последовательного» микроволново-конвекционного воздействия для обезвоживания мелкодисперсных диэлектрических объектов [Текст] / Е. А. Четвериков // Вопросы прикладной физики: межвуз. науч. сб. – Саратов : Изд-во Саратов. унив., 2001. – Вып. 7. – С.40 - 44.

135. Шаргут, Я. Эксергия [Текст] / Я. Шаргут, Р. Петела [пер. с польского под ред. В. М. Бродянского]. – М. : Энергия, 1968. – 279 с.

136. Явчуновский, В. Я. Сравнительный анализ современных технологий и оборудования сушки сельскохозяйственных продуктов [Текст] / В. Я. Явчуновский, В. Б. Пенто // Вестник ВНИИКОП. - М., 1995. – с.

137. Явчуновская, С. В. Повышение качества сушки плодоовощной продукции малой и средней влажности за счет создания и использования электрических конвейерных установок микроволновой сушки [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук [Текст] / Семенкина Н.Г. – Саратов, 1998. – 20 с.

138. Brinc, H. J. Die Trocknung von pulverförmigen und feinkörnigen Produkten in yerntrifugal strom trockner [Text] / H. J. Brinc, J. Coch, J. Fischer, F. Behrens // Chem. Techn. – 1975. - V. 27, no. 11. - P. 664–667.

139. Energieeinsparung durch Ruckföhrung von Getreideschlempe in den Maischprozeß [Текст] / W. Heinig, J. Einenckel, H. Werther et al. // Lebensmittelindustrie. - 1986. – № 5. - S. 217-220.

140. Kuchentahl, G. Drallrohr – trocken systemkurhchemie für pulfförmige stoffe [Text] / G. Kuchentahl, M. Landenbacher // Chem. Ind. -1976. - V. 16, no. 9. - P. 619–622.

141. Möglichkeiten der Verwertung von Schlempe einer Getreidebrennerei [Text] / W. Heinig, J. Einenckel, H. Werther, W. Roesch // Lebensmittelindustrie. - 1985. – № 1. - S. 23-26.

142. Hug, H. Marltreber–ein preissustiges kraftfutter– mittel [Text] / H. Hug // Brauerei–Rundschau. – 1981. – V. 92? № 12. – P.

143. Prentice, N. Enzymic hydrolysis of brewers spent grains [Text] / N. Prentice // Refsquad Journal of the American Society of Brewing Chemists. – 1978. – № 4. – P. 196–200.

144. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.sushilkabr.ru/>.
Опытно-конструкторское бюро по теплогенераторам.

145. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://agro.su/>. Агромо-
техника.

146. [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://www.intecinfo.ru/>
группа компаний ИНТЕК

147. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.uteknn.ru/>.
Научно-производственное объединение ЮТЕК.

148. [Электронный ресурс]. – Режим доступа :
<http://www.malashonkov.ru/>. Чайковский насос.

149. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.alfatreid.ru/>.
Alvan Blanch. Зерносушилки непрерывного потока.

150. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.prosushka.ru/>.
Сушка пищевых продуктов.

151. [Электронный ресурс]. – Режим доступа :
<http://www.chernozemagromash.ru/>. ЧерноземАгромаш

152. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.mednatur.ru/>.
Натуральные медицинские технологии

153. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://rosfood.info/>. Рос-
сийский пищевой портал.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

**ОРЕХОВО-ЗУЕВСКИЙ ФИЛИАЛ ФЕДЕРАЛЬНОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО УЧРЕЖДЕНИЯ "МЕНДЕЛЕЕВСКИЙ
ЦЕНТР СТАНДАРТИЗАЦИИ, МЕТРОЛОГИИ И
СЕРТИФИКАЦИИ"**



Контроль качества товаров и услуг, повышение их конкурентоспособности на внутреннем и мировом рынках, обеспечение единства измерений

142600, Россия, Московская область, г. Орехово-Зуево, ул. Коминтерна, д. 1
Тел./факс: (496) 412-14-08, 412-07-94, E-mail: ozcsn@ozcsn.ru

№ п/п	Интервал температур	Ед. изм.	Образцы зречен				
			W=13%	W=15%	W=18%	W=20%	W=22%
			W _c =16,3%	W _c =17,6%	W _c =22%	W _c =25%	W _c =28%
исходная							
Коэффициент температуропроводности (a) × 10 ⁶ м ² /с							
1	20	°С	16,33 ± 0,04	16,85 ± 0,04	17,44 ± 0,04	18,50 ± 0,04	19,23 ± 0,04
2	40	°С	16,94 ± 0,04	17,56 ± 0,04	18,39 ± 0,04	19,16 ± 0,04	19,94 ± 0,04
3	60	°С	17,38 ± 0,04	17,97 ± 0,04	18,87 ± 0,04	19,88 ± 0,04	20,48 ± 0,04
4	80	°С	18,44 ± 0,04	18,92 ± 0,04	19,54 ± 0,04	20,71 ± 0,04	21,15 ± 0,04
Коэффициент теплопроводности (λ), Вт/(м·К)							
5	20	°С	0,159 ± 0,002	0,166 ± 0,002	0,176 ± 0,002	0,192 ± 0,002	0,212 ± 0,002
6	40	°С	0,161 ± 0,002	0,175 ± 0,002	0,182 ± 0,002	0,197 ± 0,002	0,216 ± 0,002
7	60	°С	0,164 ± 0,002	0,181 ± 0,002	0,189 ± 0,002	0,205 ± 0,002	0,220 ± 0,002
8	80	°С	0,166 ± 0,002	0,183 ± 0,002	0,189 ± 0,002	0,212 ± 0,002	0,225 ± 0,002
Массовая удельная теплоемкость (с), Дж/(кг·К)							
9	20	°С	3171,58 ± 0,05	3254,58 ± 0,05	3397,30 ± 0,05	3516,10 ± 0,05	3634,90 ± 0,05
10	40	°С	3304,78 ± 0,05	3446,78 ± 0,05	3530,50 ± 0,05	3649,30 ± 0,05	3768,10 ± 0,05
11	60	°С	3437,98 ± 0,05	3561,98 ± 0,05	3663,70 ± 0,05	3782,50 ± 0,05	3901,30 ± 0,05
12	80	°С	3571,18 ± 0,05	3668,18 ± 0,05	3796,90 ± 0,05	3915,70 ± 0,05	4034,50 ± 0,05
13	Плотность (ρ)	кг/м ³	1150	1145	1140	1132	1125

Моделирование вихревой сушилки

Исходные данные

Геометрические параметры сушильной камеры:

Радиус осевого патрубка ,м			$R0 := 0.03$
Радиус тангенциальных патрубков ,м			$R1 := 0.015$
Радиус цилиндрической части аппарата ,м			$R1 := 0.1$
Высота конической части, м			$H0 := 0.2$
Высота цилиндрической части, м			$H1 := 0.2$
Расход воздуха в осевом патрубке, кг/с			$G00 := 0.2$
Расход воздуха в тангенциальном патрубке, кг/с			$G10 := 0.03$
Начальный радиус частицы, м			$r_{01} := 0.02$
Начальные скорости частицы, м/с	$u_{01} := 0$	$u_{02} := 0$	$u_{03} := -0.1$
Шаг по времени, с			$\Delta t := 0.0005$
Общее время процесса, с			$\tau_1 := 1$
Параметры частицы гречихи			
диаметр ,м			$d_{ч} := 0.004$
плотность , кг/м ³			$\rho_{ч} := 1200$
теплопроводность , Вт/м К			$\lambda_{ч} := 0.323$
коэффициент потери скорости частицы			$\xi := 1$
начальная температура, С			$t_{01} := 20$
Параметры воздуха			
температура, С			$t_{воз} := 60$
плотность , кг/м ³			$\rho_{воз} := 1.06$
кинематическая вязкость, м ² /с			$\nu_{воз} := 1.90 \cdot 10^{-5}$
число Прандтля			$Pr := 0.696$
теплопроводность , Вт/м К			$\lambda_{воз} := 0.025$
теплоемкость , Дж/кг К			$c_{воз} := 1005$
влажность			$U_{воз} := 0.1$
Время сушки, с			$\tau_1 := 120$
Шаг по времени при сушке, с			$\Delta \tau_1 := 0.05$
Число интервалов по радиусу			$k_1 := 20$

Коэффициент теплопроводности, $\text{Вт/м}\cdot\text{К}$	$\lambda_m := 10^{-7}$
Коэффициент диффузии влаги в материале, $\text{м}^2/\text{с}$	$a_m := 8.5 \cdot 10^{-8}$
Относительный коэффициент термодиффузии, $1/\text{К}$	$\frac{\delta}{\lambda_m} := 0.01$
Относительный коэффициент диффузии влаги	$\frac{\delta}{a_m} := 0.01$
Теплота парообразования, $\text{Дж/кг}\cdot\text{К}$	$r_p := 2.4 \cdot 10^6$
Коэффициент термостеплопроводности, $\text{м}^2/\text{с}$	$a_q := 10^{-8}$
Начальное влагосодержание	$U_{L0} := 0.3$

Суммарный расход воздуха

$$G_{\text{воз}} := G_{00} + 2G_{10} = 0.26$$

Скорости воздуха во входных патрубках

$$U_{00} := \frac{G_{00}}{\pi R_0^2 \cdot \rho_{\text{воз}}} = 66.732$$

$$U_{10} := \frac{G_{10}}{\pi R_1^2 \cdot \rho_{\text{воз}}} = 40.039$$

Осевая скорость воздуха

$$U_{z0} := U_{00} + 2U_{10} \left(\frac{R_1}{R_0} \right)^2 = 86.751 \quad \mu_{\text{в}} := H_0 + H_1 = 0.4$$

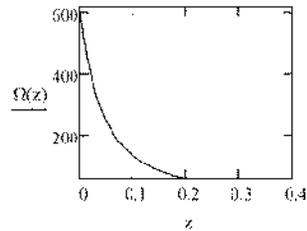
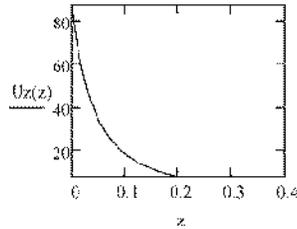
$$R(z) := \begin{cases} R_1 & \text{if } H_0 < z < H \\ R_0 + (R_1 - R_0) \frac{z}{H_0} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$U_{z(z)} := U_{z0} \left(\frac{R_1}{R(z)} \right)^2 \quad U_{z1} := U_{z(H_0)} = 7.808$$

Угловая скорость воздуха

$$\Omega_0 := 4 \frac{U_0^2 R_1^2}{U_{z0} R_0^3} = 615.984$$

$$\Omega(z) := \Omega_0 \left(\frac{R_0}{R(z)} \right)^2 \quad \Omega_1 := \Omega(H_0) = 55.439$$



$$\gamma := \arctan\left(\frac{R_1 - R_0}{H_0}\right) = 0.337$$

$$\gamma \cdot \frac{180}{\pi} = 19.29$$

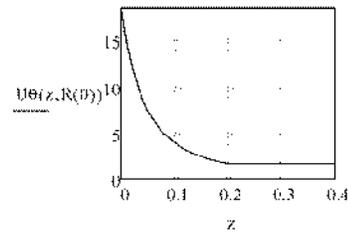
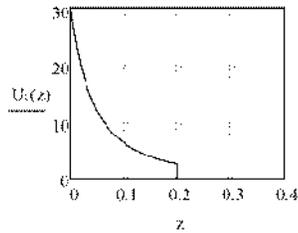
$$U_r(z) := \begin{cases} U_{z0} \tan(\gamma) & \text{if } z < H_0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$U_{r1} := U_r(0) = 30.363$$

$$U_\theta(z, r) := \Omega(z) \cdot r$$

$$U_{\theta 0} := U_\theta(0, R_0) = 18.48$$

$$U_{\theta 1} := U_\theta(H_0, R_1) = 5.544$$



Модуль вектора скорости воздуха

$$U_{\theta 0} := \Omega_0 R_0 = 18.48 \quad U_0 := \sqrt{U_r(0)^2 + U_{\theta 0}^2 + U_{z0}^2} = 93.75$$

$$U_{\theta 1} := \Omega_1 R_1 = 5.544 \quad U_1 := \sqrt{U_r(1.000; H_0)^2 + U_{\theta 1}^2 + U_{z1}^2} = 9.576$$

Движение частиц

$$i1 := \arccos\left(\frac{\tau1}{\Delta\tau} + 0.1\right) = 2 \times 10^3$$

$$m\gamma := \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot d^3 \cdot \rho\gamma = 4.021 \times 10^{-5}$$

$$Sm := \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 1.257 \times 10^{-5}$$

$$U_{\text{вир}} := \sqrt{\frac{2 \times 9.81 \cdot m\gamma}{0.4 \cdot Sm \cdot \rho_{\text{воз}}} = 12.169$$

```

M =
| r^0_0 ← r^0B
| z^0_0 ← H
| θ^0_0 ← 0
| w^0_0 ← w^0B
| uz^0_0 ← uz^0B
| r^0_0 ← r^0B
| z^0_0 ← H
| θ^0_0 ← 0
| w^0_0 ← w^0B
| wz^0_0 ← uz^0B
| uθ^0_0 ← uθ^0B
| for i ∈ 1..i1
|   Uor ← √((Ur(z^0_{i-1}) - ur_{i-1})^2 + (Uθ(z^0_{i-1}, r^0_{i-1}) - uθ_{i-1})^2 + (Uz(z^0_{i-1}) - uz_{i-1})^2)
|   Re ← Uor · dτ
|   CD ← 0.4 + 24 / Re + 4 / Re^0.5
|   ur_i ← ur_{i-1} + Δτ · [CD / (2mγ) · (Ur(z^0_{i-1}) - ur_{i-1}) · Uor · ρвоз · Sm + (uθ_{i-1})^2]
|   uθ_i ← uθ_{i-1} + Δτ · [CD / (2mγ) · (Uθ(z^0_{i-1}, r^0_{i-1}) - uθ_{i-1}) · Uor · ρвоз · Sm]
|   Rk ← R(z^0_{i-1})
|   uθ_i ← Uθ(z^0_{i-1}, Rk) if uθ_i > Uθ(z^0_{i-1}, Rk)
|   gI ← CD / (2mγ) · (Ur(z^0_{i-1}) - ur_{i-1}) · Uor · ρвоз · Sm - 9.81

```

```

uzi ← uzi-1 + Δτ · gi
rqi ← rqi-1 + Δτ · uri-1
zqi ← zqi-1 + Δτ · uzi-1
if rqi ≥ R(zqi)
  α ← atan( $\frac{uz_i}{ur_i}$ )
  urz ←  $\sqrt{(ur_i)^2 + (uz_i)^2}$ 
  uri ← -urz · ξ · cos(α + 2γ)
  uzi ← -urz · ξ · sin(α + 2γ)
  uθi ← uθi · ζ
if rqi ≤ 0
  uri ← -uri
  rqi ← |rqi|
M1,i ← rqi
M2,i ← zqi
M3,i ← uri
M4,i ← uzi
M5,i ← uθi
M

```

```

rq :=  $\left\{ \begin{array}{l} r_{q_0} \leftarrow r_{q0} \\ \text{for } i \in 1..i1 \\ r_{q_i} \leftarrow M_{1,i} \end{array} \right.$ 
zq :=  $\left\{ \begin{array}{l} z_{q_0} \leftarrow H \\ \text{for } i \in 1..i1 \\ z_{q_i} \leftarrow M_{2,i} \end{array} \right.$ 
ur :=  $\left\{ \begin{array}{l} ur_0 \leftarrow ur0 \\ \text{for } i \in 1..i1 \\ ur_i \leftarrow M_{3,i} \end{array} \right.$ 
ur

```

```

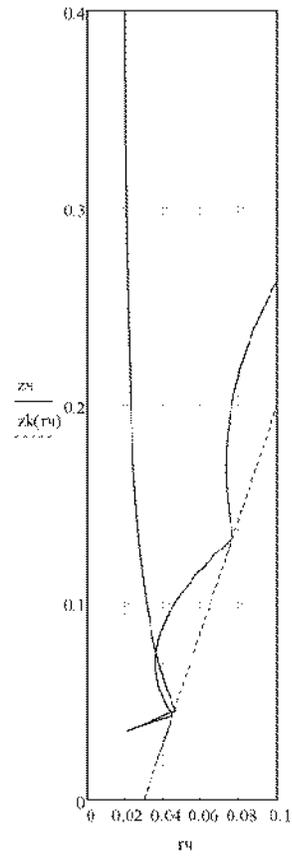
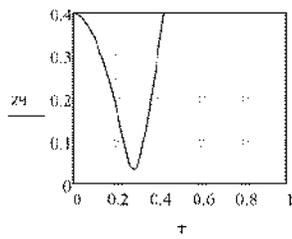
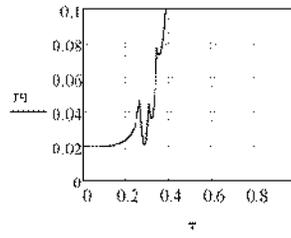
uz :=  $\left\{ \begin{array}{l} uz_0 \leftarrow uz0 \\ \text{for } i \in 1..i1 \\ uz_i \leftarrow M_{4,i} \end{array} \right.$ 
uz
uθ :=  $\left\{ \begin{array}{l} u\theta_0 \leftarrow u\theta0 \\ \text{for } i \in 1..i1 \\ u\theta_i \leftarrow M_{5,i} \end{array} \right.$ 
uθ

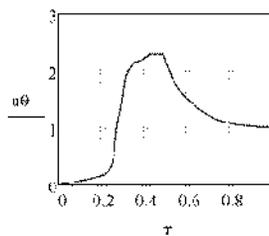
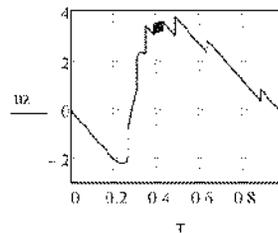
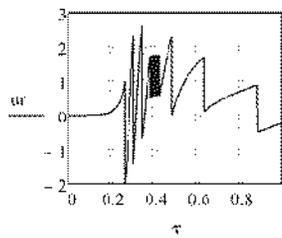
```

$i := 1..11$

$\tau_i := i \cdot \Delta\tau$

$zk(\tau) := 111 \cdot \frac{(\tau - R0)}{R1 - R0}$

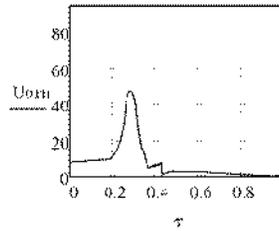




Относительная скорость газа

$i = |L \cdot i|$

$$\begin{aligned}
Uom_i := & \left| \begin{array}{l}
Uor \leftarrow \sqrt{(Ur(z_{i-1}) - ur_{i-1})^2 + (U\theta(z_{i-1}, r_{i-1}) - u\theta_{i-1})^2 + (Uz(z_{i-1}) - uz_{i-1})^2} \\
Re \leftarrow \frac{Uor \cdot d\tau}{U \cdot \omega \cdot \gamma} \\
CD \leftarrow 0.4 + \frac{24}{Re} + \frac{4}{Re^{0.5}} \\
ur_i \leftarrow ur_{i-1} + \Delta\tau \cdot \left[\frac{CD}{2m\gamma} (Ur(z_{i-1}) - ur_{i-1}) \cdot Uor \cdot \rho_{\text{B03}} \cdot Sm + \frac{(u\theta_{i-1})^2}{r_{i-1}} \right] \\
u\theta_i \leftarrow u\theta_{i-1} + \Delta\tau \cdot \left[\frac{CD}{2m\gamma} (U\theta(z_{i-1}, r_{i-1}) - u\theta_{i-1}) \cdot Uor \cdot \rho_{\text{B03}} \cdot Sm \right] \\
Rk \leftarrow R(z_{i-1}) \\
u\theta_i \leftarrow U\theta(z_{i-1}, Rk) \quad \text{if } u\theta_i > U\theta(z_{i-1}, Rk) \\
gl \leftarrow \frac{CD}{2m\gamma} (Ur(z_{i-1}) - ur_{i-1}) \cdot Uor \cdot \rho_{\text{B03}} \cdot Sm - 9.8t \\
uz_i \leftarrow uz_{i-1} + \Delta\tau \cdot gl \\
r_{i-1} \leftarrow r_{i-1} + \Delta\tau \cdot ur_{i-1} \\
z_{i-1} \leftarrow z_{i-1} + \Delta\tau \cdot uz_{i-1} \\
\text{if } z_{i-1} \geq R(z_{i-1}) \\
\left| \begin{array}{l}
\alpha \leftarrow \arctan\left(\frac{uz_i}{ur_i}\right) \\
ur_z \leftarrow \sqrt{(ur_i)^2 + (uz_i)^2} \\
ur_i \leftarrow -ur_z \cdot \xi \cdot \cos(\alpha + 2\gamma) \\
uz_i \leftarrow -ur_z \cdot \xi \cdot \sin(\alpha + 2\gamma) \\
u\theta_i \leftarrow u\theta_i \cdot \xi
\end{array} \right. \\
\text{if } z_{i-1} \leq 0 \\
\left| \begin{array}{l}
ur_i \leftarrow -ur_i \\
r_{i-1} \leftarrow |r_{i-1}|
\end{array} \right. \\
Uom_i \leftarrow Uor \\
Uom_i
\end{array} \right.
\end{aligned}$$



$$U_{\text{ср}} := \frac{1}{\tau_1} \sum_{i=0}^{j1-1} (U_{0m_i} \cdot \Delta r) \quad U_{\text{ср}} = 7.43$$

$$\frac{U_{\text{ср}}}{U_{\text{шт}}} = 0.6:1$$

Коэффициент теплоотдачи

$$Re := \frac{U_{\text{ср}} \cdot d_{\text{ч}}}{\nu_{\text{воз}}} = 1.564 \times 10^3$$

$$Nu := 2 + 0.51 \cdot Re^{0.52} \cdot Pr^{0.33} = 22.734$$

$$\alpha := \frac{Nu \cdot \lambda_{\text{воз}}}{d_{\text{ч}}} = 164.819$$

$$\beta := \frac{\alpha \cdot d_{\text{ч}}}{\lambda_{\text{ч}}} = 2.041$$

Коэффициент массоотдачи

$$D := 2.19 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{1803 + 273}{273} \right)^{1.5} = 2.95 \times 10^{-5}$$

$$Sh := \frac{\nu_{\text{воз}}}{D} = 0.644$$

$$Num := 2 + 0.51 \cdot Re^{0.52} \cdot Sh^{0.33} = 22.209$$

$$\alpha_{\text{м}} := \frac{Num \cdot D}{d_{\text{ч}}} = 0.164$$

Шаг по радиусу частицы,

$$R_{\text{ч}} := \frac{d_{\text{ч}}}{2} = 2 \times 10^{-3} \quad \Delta r := \frac{R_{\text{ч}}}{k1} \quad \Delta r = 1 \times 10^{-4}$$

$$j1 := \text{trunc} \left(\frac{\pi r}{\Delta r} + 0.1 \right) = 2.4 \times 10^3$$

$$k := 0..k1$$

$$r_k := k \cdot \Delta r$$

Сеточные числа Био и Фурье

$$\frac{Bi}{\lambda r} := \frac{\alpha \cdot \Delta r}{\lambda r} = 0,051$$

$$Bim := \frac{\alpha m \cdot \Delta r}{\lambda m} = 163,809$$

$$\epsilon r := -673 + 53(\theta_{\text{воз}} + 273) + 396 \cdot 16 + 0,164 \theta_{\text{воз}} = 2,068 \times 10^3$$

$$\Delta \tau t = 0,35$$

$$Fo := \frac{\lambda q \cdot \Delta \tau t}{\epsilon r \cdot \rho c \cdot \Delta r^2} = 0,651$$

$$Fom := \frac{m \cdot \Delta \tau t}{\Delta r^2} = 0,425$$

Коэффициенты переноса

$$\Lambda 11 := am = 8,5 \times 10^{-8}$$

$$\Lambda 12 := am \cdot \delta = 8,5 \times 10^{-10}$$

$$\Lambda 21 := \frac{m^2 \cdot \epsilon}{\epsilon r} \cdot am = 9,804 \times 10^{-7}$$

$$\Lambda 22 := aq + \Lambda 21 \cdot \delta = 1,986 \times 10^{-8}$$

```

M := for k ∈ 0..kl
  M1,k ← Ul,r
  M2,k ← tr,m
  for j ∈ 0..j1
    for k ∈ kl..0
      if k = kl
        Mn1,k ← (M1,k-1 + Bim·Ul,voz) / (1 + Bim)
        Mn2,k ← (M2,k-1 + Bi·θvoz) / (1 + Bi)
        M1,k ← Mn1,k
        M2,k ← Mn2,k
      for k ∈ kl-1..1
        ΔUl,r ← M1,k-1 · (1 + Δr/rk) + -2·M1,k + M1,k-1 · (1 - Δr/rk)
        Δtr ← M2,k+1 · (1 + Δr/rk) + -2·M2,k + M2,k-1 · (1 - Δr/rk)
        ΔM1,k ← Δr·Δ11 / ΔM1,k
  
```

```

M :=
  for k in 0..kl
    Δr² ← Δr²
    ΔMt ← (Δr1·A12) / Δr² · Δtr
    Mn1,k ← M1,k + ΔMtU + ΔMt
    ΔMU ← (Δr1·A21) / Δr² · ΔULr
    ΔMt ← (Δr1·A22) / Δr² · Δtr
    Mn2,k ← M2,k + ΔMtU + ΔMt
  Mn1,0 ← Mn1,1
  Mn2,0 ← Mn2,1
  for k in 0..kl
    M1,k ← Mn1,k
    M2,k ← Mn2,k
  M

```

```

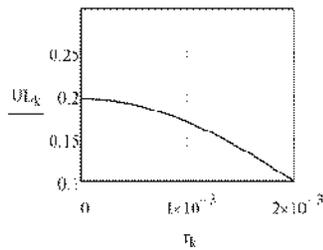
UL :=
  for k in 0..kl
    ULk ← M1,k
  UL

```

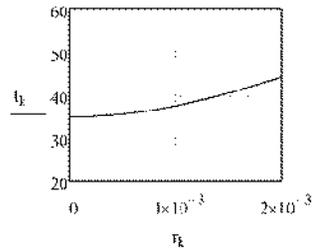
```

l :=
  for k in 0..kl
    lk ← M2,k
  l

```



$$UL_{cp} := \frac{1}{kl+1} \cdot \sum_{k=0}^{kl} UL_k = 0.162$$



$$l_{cp} := \frac{1}{kl+1} \cdot \sum_{k=0}^{kl} l_k = 38.42$$