

На правах рукописи



Урманов Артур Ильдарович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СУШКИ ВЫСОКОВЛАЖНЫХ СЕМЯН
РАПСА НА ОСНОВЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
СУШИЛЬНОГО АГЕНТА И ОБЪЕКТОВ СУШКИ РАЗЛИЧНОЙ ВЛАЖНОСТИ**

Специальность 4.3.3 – Пищевые системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва, 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ)»

Научный руководитель: **Щетинин Михаил Павлович**
доктор технических наук, профессор,
вице-президент НОЧУ ДПО «Международная
промышленная академия»

Официальные оппоненты: **Шахов Сергей Васильевич**
доктор технических наук, профессор кафедры
машин и аппаратов пищевых производств
ВГБОУ ВО «Воронежский государственный
университет инженерных технологий»

Шорсткий Иван Александрович
кандидат технических наук, доцент кафедры
технологического оборудования и систем
жизнеобеспечения ФГБОУ ВО «Кубанский
государственный технологический
университет»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Оренбургский государственный
университет»

Защита состоится: « 27 » _____ февраля _____ 2025 г. в 10 часов 00 минут на заседании объединенного совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук 99.0.092.02 по научной специальности 4.3.3 Пищевые системы (технические науки) при ФГАНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности», ФГБОУ ВО «Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ)» по адресу 125080, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 11, корп. А, Зал А-1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеках ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии», ФГБОУ ВО «Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ)». Полный текст диссертации размещен в сети Интернет на официальном сайте ФГБОУ ВО «РОСБИОТЕХ» <http://www.mgupp.ru>.

С авторефератом можно ознакомиться на официальных сайтах ВАК Минобрнауки РФ (<http://vak.ed.gov.ru>) и ФГБОУ ВО «РОСБИОТЕХ» (<http://www.mgupp.ru>).

Автореферат разослан « ____ » _____ 20 ____ г.

Ученый секретарь
Совета 99.0.092.02, к.т.н., доц.



Николаева Ю.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Рапс является ценной продовольственной культурой. Производство рапса в России за последние 10 лет увеличилось в четыре раза, достигнув максимума – 4,5 млн т в 2022 году. Семена рапса являются источником растительного масла и высокобелковых ингредиентов кормов. Вторичные продукты, получаемые после отжима масла (жмых и шрот), содержат до 43% сырого белка и по энергетической ценности не уступают вторичным продуктам переработки семян подсолнечника. Рапсовое масло является пищевым, применяется в производстве специализированных жиров и маргарина, а также находит применение в металлургической, лакокрасочной, мыловаренной, текстильной и других отраслях промышленности. В последнее время многие страны, включая и Россию, проводят научные исследования в направлении получения из семян рапса биотоплива. Семена новых селекционных сортов рапса характеризуются минимальным содержанием вредной эруковой кислоты.

Способ отдельной уборки семян рапса не нашёл широкого применения в связи с их неравномерным созреванием и склонностью к осыпанию. Поэтому при уборке, как правило, применяется способ прямого комбайнирования, вследствие чего семена рапса имеют повышенную влажность. Семенная масса высоковлажного рапса характеризуется интенсивными процессами самосогревания, способствующими существенному снижению основных качественных характеристик.

Одним из основных элементов системы послеуборочной обработки семян является их сушка. Правильно организованный процесс сушки позволяет обеспечить длительное хранение заготавливаемых семян при минимальных потерях массы и качества, а также с наименьшими энергозатратами.

На хлебоприёмные предприятия семена рапса зачастую поступают с неравномерной и высокой начальной влажностью, что определяет необходимость обеспечения их оперативной сушки в целях предотвращения развития процессов самосогревания. При общем сборе семян рапса в России на уровне 4,5 млн т в год, сушке подлежат около 3,6 млн т семян. На большинстве элеваторов России используется технология прямоточной сушки, которая не позволяет обеспечить снижение влажности семян до значений, необходимых для их размещения на хранение (7%) за один пропуск через сушилку.

В условиях постоянно увеличивающихся объемов заготавливаемых семян рапса, исследования, направленные на повышение эффективности сушки семян высоковлажного рапса, являются актуальными.

Степень разработанности темы. Значительный вклад в исследование и развитие теории сушки и хранения семян внесли российские и зарубежные учёные А.С. Гинзбург, А.П. Гержой, В.Б. Фейденгольд, В.И. Атаназевич, Л.А. Трисвятский, Л.Д. Комышкник, Н.П. Козмина, П.А. Ребиндер, Е. Экcert, А. Aboltins и другие ученые. В области изучения и совершенствования процессов сушки зерна наиболее известны работы А.В. Лыкова, В.А. Резчикова, В.Ф. Сорочинского, Г.С. Зелинского, Г.К. Филоненко, О.Н. Налеева, Н.И. Малина, С.В. Савченко, и других, однако в существующих инструкциях по сушке зерна и масличных культур отсутствует развернутая информация по рекомендуемым режимам сушки семян рапса на рециркуляционных зерносушилках.

Целью исследования являлось повышение эффективности сушки семян рапса с высокой начальной влажностью на основе исследования системного взаимодействия сушильного агента и объектов сушки различной влажности за счёт разработки технологии сушки, обеспечивающей требуемые качественные и технико-экономические показатели при хранении и последующей переработке семян.

Для достижения заявленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Исследовать влияние режимов конвективной сушки семян рапса на кинетику процесса сушки однородных по влажности семян.
2. Изучить влияние режимов конвективной сушки семян рапса на кинетику процесса сушки смеси семян с различной начальной влажностью.

3. Исследовать влияние режимов охлаждения на кинетику процесса охлаждения семян рапса после сушки.

4. Определить влияние параметров конвективной сушки на качественные характеристики семян рапса при системном взаимодействии сушильного агента и объектов сушки.

5. Разработать математическую модель зависимости температуры и влажности высушиваемых семян от режимов их сушки и охлаждения.

6. Разработать технологию рециркуляционной сушки высоковлажных семян рапса на основе применения квазиизотермических режимов и провести её апробацию в производственных условиях.

7. Разработать нормативно-техническую документацию (технические условия) по сушке семян высоковлажного рапса при квазиизотермических режимах.

8. Провести сравнительный анализ технико-экономической эффективности применения разработанной технологии рециркуляционной сушки семян рапса при квазиизотермических режимах с сушкой при осциллирующих режимах.

Научная новизна. Впервые были получены научные данные о специфике протекания процессов сушки семян рапса при квазиизотермических режимах - выявлены зависимости влияния скорости и температуры сушильного агента, начальной влажности семян и продолжительности контактного теплообмена между семенами с различной начальной влажностью на скорость сушки семян при квазиизотермических режимах и на качественные характеристики высушиваемых семян рапса.

Научно доказано, что сушка семян рапса при квазиизотермических режимах протекает более интенсивно как в сравнении с сушкой при осциллирующих режимах, так и в сравнении с сушкой злаковых культур при аналогичных режимах ввиду более высокого коэффициента диффузии влаги у семян рапса.

Научно доказано, что применение квазиизотермических режимов при сушке семян рапса обеспечивает более высокую стабильность показателей качества высушиваемых семян в сравнении с традиционным методом рециркуляционной сушки при осциллирующих режимах. Это относится к таким параметрам как всхожесть и энергия прорастания семян, а также перекисное и кислотное числа масла, получаемого из просушенных семян. Данный эффект обеспечивается за счёт сокращения продолжительности термического воздействия на семенную массу благодаря интенсификации процессов сушки.

Выявленные зависимости интенсивности протекания процессов сушки и охлаждения в семенной массе рапса от заданных режимов позволили получить математические модели в виде уравнений регрессии с высоким уровнем аппроксимации, позволяющие описать и спрогнозировать сушку семян при установленных режимах.

Новизна предложенных технологических решений подтверждена патентом РФ на изобретение (№ 2812479) от 30.01.2024 г.

Теоретическая и практическая значимость. Теоретическая и практическая значимость работы заключается в обосновании и внедрении в производство способов и режимов сушки семян рапса, обеспечивающих значительное повышение производительности сушилок, экономию топлива при сохранении основных качественных показателей высушиваемых семян.

Разработанная технология рециркуляционной сушки адаптирована для сушки семян рапса с высокой начальной влажностью. Данная технология подразумевает предварительный нагрев семян и описывается условным равенством температур высушиваемых семян в начале и конце процесса с их промежуточным охлаждением. Данный эффект обеспечивается за счёт интенсивного испарения влаги вследствие дополнительного подвода тепла в верхнюю зону сушки. По этой причине предложенный способ сушки является квазиизотермическим.

Применение разработанной технологии в производственных условиях позволило провести сушку семян рапса при рациональных режимах, которые обеспечили

наименьшее снижение кислотного числа масла в сравнении с «классической» рециркуляционной сушкой, что свидетельствует о сведении к минимуму нежелательных гидролитических процессов путём быстрой инактивации липазы с одной стороны и о недопущении окислительного распада и связывания липидов с другой. При этом производительность сушилки увеличилась на четверть, при максимальной начальной влажности высушиваемых семян более 25%.

Были разработаны и утверждены технические условия ТУ 9721215-00946257-2016 на рециркуляционную сушку семян рапса при квазиизотермических режимах. Разработанная технология сушки семян рапса апробирована на ОАО «Набережночелнинский элеватор» (в настоящее время АО «Набережночелнинский элеватор»). Было установлено, что предложенный способ сушки обеспечивает снижение удельных затрат на плановую тонну высушиваемых семян более чем на 10% и обеспечивает окупаемость инвестиций менее чем за один заготовительный сезон. Результаты исследований применимы при проектировании новых и реконструкции действующих зерносушилок.

Методология и методы диссертационного исследования. Методологической основой исследований является изучение системного взаимодействия сушильного агента и объектов сушки различной влажности с целью обеспечения сохранности основных качественных показателей заготавливаемых семян и снижения затрат на их сушку. Для решения поставленных задач были применены методы исследования, основанные на оценке влияния различных режимов сушки и охлаждения семян рапса на кинетику протекания процессов, а также на изменение качественных показателей высушиваемых семян. В ходе исследований применялась математическая обработка данных, были проведены производственные испытания разработанной технологии сушки семян.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Влияние квазиизотермических режимов сушки и охлаждения семян рапса на интенсивность протекания процессов сушки и охлаждения.
2. Влияние квазиизотермических режимов сушки и охлаждения семян рапса на сохранность качественных характеристик высушиваемых семян и оптимизацию технико-экономических показателей процесса.
3. Разработанная технология рециркуляционной сушки, адаптированная для сушки высоковлажных семян рапса.

Степень достоверности результатов. Достоверность полученных результатов подтверждена использованием современных средств и методов исследований, трёхкратной повторностью проведенных опытов, математической обработкой полученных экспериментальных данных с помощью программы Microsoft Excel 2016 и апробацией полученных результатов в производственных условиях. Все научные положения, выводы и рекомендации, изложенные в диссертации, обоснованы и подтверждены экспериментальными исследованиями и материалами.

Апробация работы. Полученные данные и рекомендуемые режимы сушки подтверждены в ходе практических испытаний реконструированной зерносушилки, по окончании которых был подписан акт внедрения результатов диссертационного исследования на ОАО «Набережночелнинский элеватор».

Результаты исследований докладывались на XI научно-практической конференции «Технологии и продукты здорового питания. Функциональные пищевые продукты» (г. Москва, 2013 г.); международной научно-практической конференции «Современные концепции развития науки» (Уфа, 2014 г.); международной научно-практической конференции «Тенденции развития технических наук» (Уфа, 2014 г.); международной научно-практической конференции «Современное состояние и перспективы развития технических наук» (Уфа, 2014 г.); международной научно-практической конференции «Теоретические и практические вопросы науки XXI века» (Уфа, 2015 г.); международной заочной научной конференции «Проблемы современной аграрной науки» (Красноярск, 2015 г.); XIX международной научно-практической

конференции «Наука России: Цели и задачи» (г. Екатеринбург, 2020 г.); III всероссийской научно-практической конференции «Стратегия современного научно-технологического развития: проблемы и перспективы реализации» (г. Петрозаводск 2021 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 16 печатных работ, отражающих её основное содержание. Из них 6 работ в журналах, рекомендованных ВАК при Минобрнауки РФ, и 1 патент РФ на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объём работы - 183 страницы, включает 36 рисунков и 19 таблиц. Список литературы состоит из 137 источников российских и зарубежных авторов.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертационная работа соответствует пунктам 4, 7, 10, 23 паспорта научной специальности ВАК при Минобрнауки РФ (технические науки) 4.3.3. – «Пищевые системы»: 4. «Технология обработки, хранения и переработки злаковых, бобовых культур, крупяных продуктов, плодоовощной продукции и виноградарства», 7. «Технология жиров, продуктов переработки растительных масел, масличного и эфирно-масличного сырья», 10. «Механизмы и прогнозирование трансформаций сырья и пищевых продуктов на различных этапах жизненного цикла продукта», 23. «Адаптация процессов пищевых производств к перерабатываемому сырью».

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформированы цель и задачи исследований, показаны научная новизна и практическая значимость результатов исследований.

1 Обзор литературы

Проведен анализ современного состояния и технологических особенностей сушки семян рапса, на основании которого сформулированы цель и задачи исследований.

2 Экспериментальная часть

Экспериментальные исследования процессов и выбор режимов сушки семян рапса проводились в лаборатории кафедры «Зерна, хлебопекарных и кондитерских технологий» Московского государственного университета пищевых производств (ныне – Росбиотех) и в производственно-технологической лаборатории ОАО «Набережночелнинский элеватор». Схема проведения исследований представлена на рисунке 1.

По представленной схеме проведенные исследования были разделены на три этапа. На первом этапе выполнили теоретические исследования, состоявшие из анализа научно-технической литературы по вопросам состояния сушки семян рапса, а также формулирования направлений исследований, целей и научных задач. На втором этапе провели экспериментальные исследования по изучению влияния режимов сушки и охлаждения семян рапса на кинетику протекания процессов, а также на качественные показатели высушиваемых семян.

На третьем заключительном этапе осуществляли практическую реализацию результатов исследований, включающую апробацию разработанной технологии в производственных условиях, анализ технико-экономической эффективности и разработку технических условий. Проведенные исследования были основаны на изучении системного взаимодействия сушильного агента и объектов сушки различной влажности, при котором начальные характеристики одного элемента системы непосредственным образом влияют на характеристики другого элемента в течение протекания процесса. При этом характеристики первого элемента также изменяются.

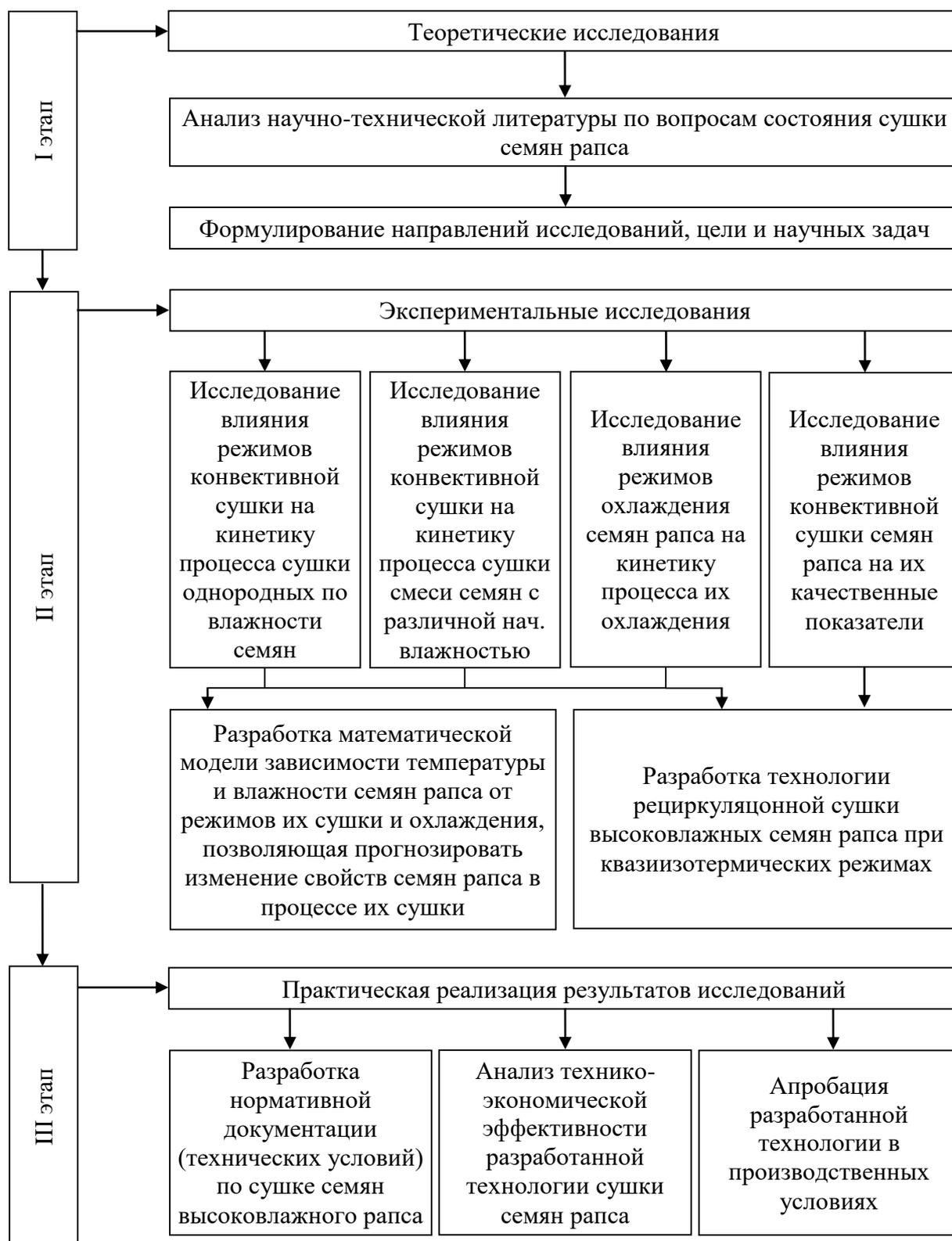


Рисунок 1 – Структурная схема проведения исследований.

Данные зависимости отражены в виде математических уравнений, представленных на соответствующих графиках, а также сформулированы в виде математической модели в разделе 2.2.5.

2.1 Объекты и методы исследований

Исследования проводили на семенах рапса ярового сорта «Ратник» с содержанием эруковой кислоты не более 0,5% от суммы жирных кислот. Масса 1000 семян от 3,4 до 4,7 г. Содержание жира в семенах от 42,1 до 47,3%. Регион производства

исследуемых партий семян – Республика Татарстан. Характеристики семян рапса определяли в соответствии с методами, предусмотренными ГОСТ 10583-76 «Рапс для промышленной переработки». Экспериментальные исследования были выполнены на лабораторной установке, моделирующей отдельные этапы технологического процесса сушки семян при осциллирующих и квазиизотермических режимах.

В теории сушки режимы, при которых температура зерна в конце процесса сушки сопоставима с первоначальными значениями, называют квазиизотермическими. При данных режимах сушки тепло, подводимое агентом сушки, расходуется только на испарение влаги.

В ходе лабораторных исследований просушили 450 кг семян рапса при различных режимах сушки.

Измерение влажности осуществляли на СЭШ-3М в соответствии с ГОСТ 13586.5-2015. Увлажнение семян осуществляли в соответствии с методикой, описанной в ГОСТ Р 8.581-2001.

Параметры процесса: скорость воздуха, толщина семенного слоя, температура агента сушки, продолжительность контактного теплообмена, соответствовали параметрам действующих шахтных рециркуляционных зерносушилок типа ДСП.

Скорости сушильного агента и охлаждающего воздуха регулировали при помощи реостата, подключенного к электродвигателю вентилятора высокого давления. Температуру агента сушки измеряли при помощи датчика температуры маятникового типа РРТМ 1.

При проведении лабораторных испытаний относительная влажность атмосферного воздуха составила около 60%. При проведении производственных испытаний она варьировала в диапазоне 52-78%.

Начальная влажность семян рапса в различных опытах составляла от 9,5 до 25%. Опыты проводили в трёхкратной повторности.

Предварительный нагрев семян осуществляли при помощи сушильного агента температурой 120°C и скоростью от 2,5 до 5 м/с в псевдооживленном слое.

Проведение анализа качественных характеристик выполняли в соответствии со стандартной методологией:

- кислотное число масла – титриметрическим методом с извлечением масла путем экстрагирования этиловым эфиром в аппарате Сокслета в соответствии с ГОСТ 10858-77;

- перекисное число масла – в соответствии с методом, основанным на реакции взаимодействия продуктов окисления растительного масла с йодистым калием в растворе уксусной кислоты и хлороформа с последующим количественным определением выделившегося йода раствором тиосульфата натрия титриметрическим методом (ГОСТ Р 51487-99);

- всхожесть и энергия прорастания семян – путем проращивания в темноте, на фильтровальной бумаге при 25°C в соответствии с ГОСТ 12038-84.

Также изучали процессы сушки смеси семян с различной влажностью и температурой при различной длительности теплообмена. Принципиальное отличие моделирования заключалось в необходимости нагрева и смешивания двух проб семян различной начальной влажности с последующей выдержкой в термостате. Длительность теплообмена между пробами семян с различной начальной влажностью установили на основании литературных данных (аналогично продолжительности теплообмена в действующих производственных зерносушилках). Данный процесс моделировали путём нагрева и выдержки двух проб семян с различной начальной влажностью в термостате в стеклянном сосуде в течение заданной продолжительности времени при температуре 60°C.

Математическая обработка экспериментальных данных осуществлялась в программе Microsoft Excel 2016. По результатам проведенной математической обработки получены уравнения регрессии.

Производственную апробацию разработанной технологии рециркуляционной сушки проводили на ОАО «Набережночелнинский элеватор» на модернизированной зерносушилке

непрерывного действия типа «Целинная» на базе ДСП-24 СН с предварительным нагревом семян в заторможенно-падающем слое и воздухопроводом, обеспечивающим дополнительную подачу сушильного агента в верхнюю часть напорно-распределительной камеры.

Производительность зерносушилки определяли по показаниям бункерных весов ДН-2000. Для контроля относительной влажности и температуры атмосферного воздуха использовали микропроцессорный датчик относительной влажности и температуры ДВТ-02. Влажность семян на различных этапах процесса определяли при помощи экспресс-влажмера «Wileb5» и подтверждали путём высушивания навесок из проб семян в сушильном шкафу СЭШ-3М в соответствии с ГОСТ 13586.5-2015. Осуществлялся автоматизированный контроль влажности и температуры семян на выходе из охладительной шахты при помощи отечественного поточного влагомера «Фауна-М». Контроль температуры высушиваемых семян рапса и агента сушки осуществлялся дистанционно при помощи платиновой-платиновых термопар и устройства контроля температуры ОВЕН УКТ38-В с аварийной сигнализацией, срабатывающей в случае выхода любого из контролируемых параметров за заданные пределы.

Анализ качественных показателей семян рапса осуществляли на основании средней пробы семян, сформированной путем отбора и смешения четырех проб семян одинаковой массы, отобранных через равные промежутки времени (интервал 30-40 минут). Для анализа воздействия режимов сушки семян на их качественные характеристики пробы отбирали на входе в сушилку (сырые семена) и на выходе из неё (просушенные семена).

2.2 Результаты исследований и их анализ

2.2.1 Влияние режимов конвективной сушки на кинетику процесса сушки однородных по влажности семян рапса

Во всех опытах на первом этапе осуществляли кратковременный предварительный нагрев семян рапса в состоянии псевдооживленного слоя до предельно допустимой температуры нагрева семян равной 60°C. Снижение влажности семян на данном этапе составило от 0,2 до 0,4% от начальной. Далее приступали непосредственно к сушке семян нагретым сушильным агентом, либо атмосферным воздухом.

Результаты исследований влияния изменения температуры сушильного агента в интервале от 80 до 120°C на кинетику сушки приведены на рисунках 2 и 3. Начальную влажность семян, равную 13%, приняли исходя из значений снижения влажности при сушке одной плановой тонны.

Данные опытов, представленные на рисунке 2, продемонстрировали, что влажность семян рапса в ходе сушки при квазиизотермических режимах способна снижаться от 4,0 до 6,5%.

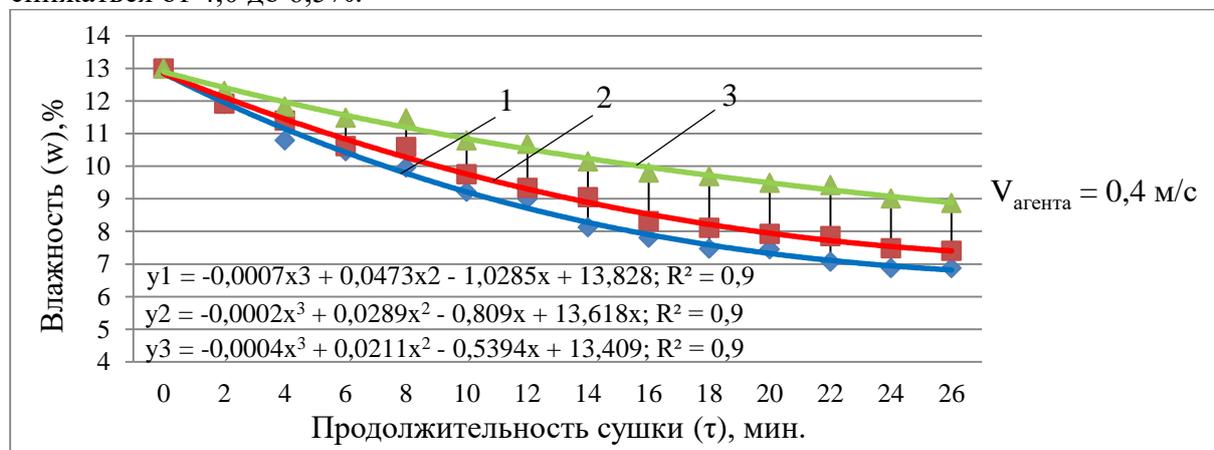


Рисунок 2 – Зависимости влажности семян рапса от температуры сушильного агента: 1 - при сушке агентом температурой 120°C, 2 - при сушке агентом температурой 100°C, 3 - при сушке агентом температурой 80°C.

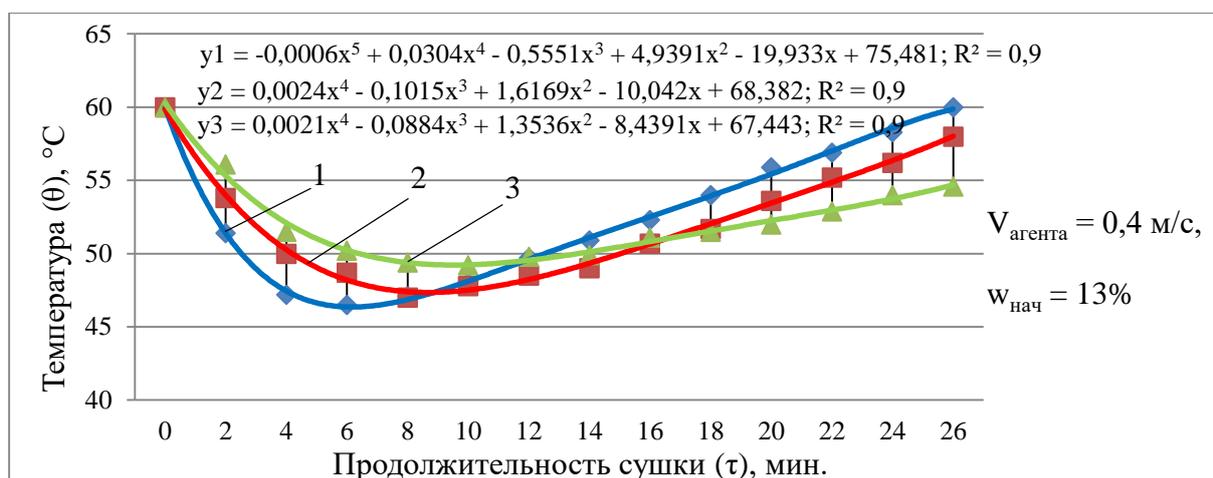


Рисунок 3 – Зависимости температуры семян рапса от температуры сушильного агента: 1 - при сушке агентом температурой 120°C, 2 - при сушке агентом температурой 100°C, 3 - при сушке агентом температурой 80°C.

По результатам опытов, представленных на рисунке 3, температура семян рапса снижается в начале процесса от 60 до 46°C, после чего начинает возрастать, что является характерной особенностью рассматриваемого процесса. Необходимо отметить, что температура семян рапса остается в пределах допустимой нормы в течение всего процесса сушки.

Вопреки тому, что температура агента сушки была выше температуры высушиваемых семян от 20 до 60°C, в начале эксперимента наблюдалось снижение их температуры. Данный эффект обусловлен интенсивным испарением влаги из семян за счет расходования части тепла, накопленного в них при предварительном нагреве. Аналогичные данные по снижению температуры семян при различных температурах агента сушки объясняются неравномерными затратами тепла, расходуемыми сушильным агентом и семенами на испарение влаги.

Процесс сушки семян протекает с различной интенсивностью. На начальной стадии процесса наблюдается максимальная скорость сушки, что обусловлено испарением влаги преимущественно из верхних слоёв семян. По ходу процесса интенсивность испарения влаги сокращается, при этом температура семян начинает увеличиваться. Это связано с расширением зоны испарения внутрь семени.

По данным, представленным на рисунке 3, видно, что температура семян в конце исследования достигает исходного значения только в опыте с температурой агента сушки 120°C. При более низких температурах сушильного агента к концу процесса сушки температура семян составляла 54,5-58°C.

На следующем этапе исследований изучали влияние начальной влажности рапса на кинетику сушки однородных по влажности семян. Результаты опытов представлены на рисунках 4 и 5.

Серия опытов, результаты которых представлены на данных рисунках, продемонстрировала, что повышенная начальная влажность семян ведёт к повышению интенсивности снижения температуры и влажности семян в начале опыта – максимальное снижение температуры у семян влажностью 25% составило 20°C, в то время как у семян рапса влажностью 14% снижение составило лишь 10°C.

Снижение влажности семян в этих опытах, согласно данным, представленным на рисунке 4, составляло от 6 до 9% для семян с начальной влажностью от 14 до 25%. При этом сушку семян осуществили при температуре ниже предельно допустимой для семян рапса, как и в ранее проведенных опытах.

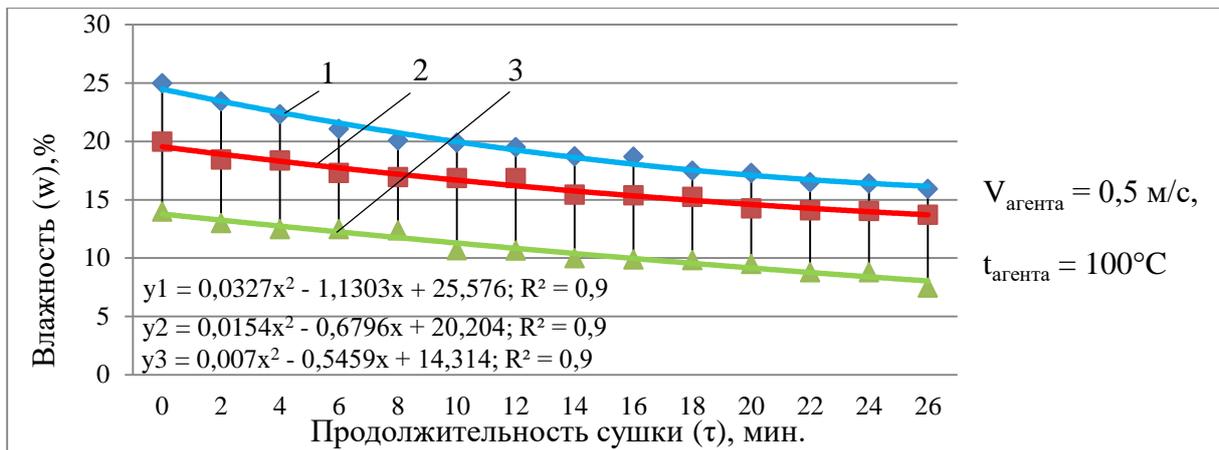


Рисунок 4 – Зависимости влажности высушиваемых семян рапса от начальной влажности семян: 1 - при начальной влажности 25%; 2 - при начальной влажности 20%; 3 - при начальной влажности 14%.

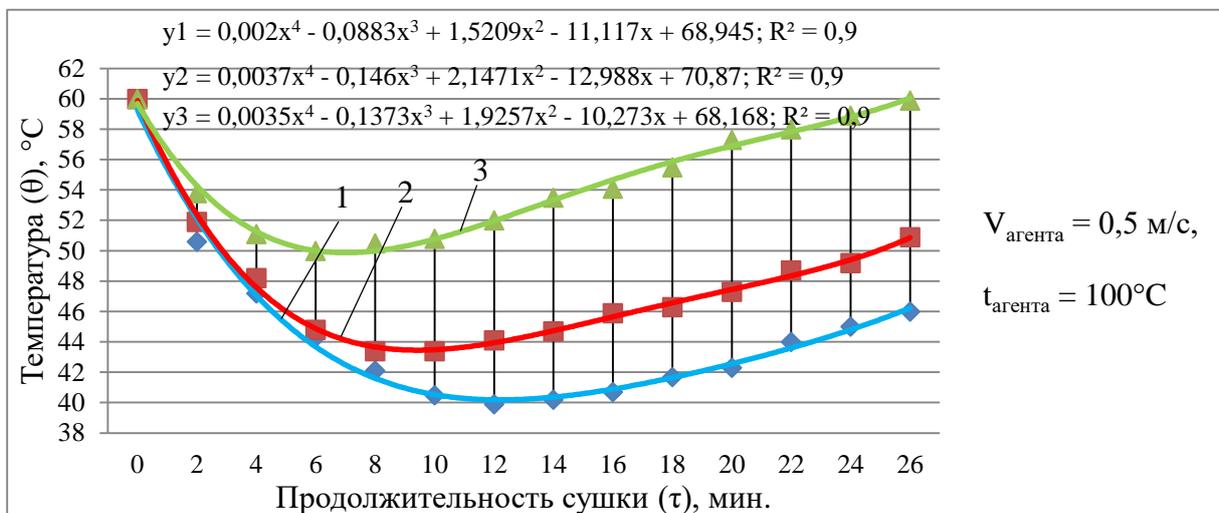


Рисунок 5 – Зависимости температуры семян рапса от начальной влажности семян: 1 - при начальной влажности 25%; 2 - при начальной влажности 20%; 3 - при начальной влажности 14%.

Снижение влажности семян рапса в опытах по сушке семян с различной начальной влажностью происходит неравномерно. Это также характерно и для ранее проведенных опытов сушки семян рапса сушильным агентом различной температуры. На начальном этапе скорость сушки увеличивается за счёт испарения влаги из верхних слоёв семени. В дальнейшем распространение зоны испарения вглубь семени снижает скорость испарения влаги.

2.2.2 Влияние режимов конвективной сушки на кинетику процесса сушки смеси семян рапса с различной начальной влажностью

В существующих рециркуляционных зерносушилках высушиваемые семена представляют собой смесь семян различной влажности, что обусловлено принципом работы этих установок - циклическим высушиванием рециркулирующих семян и смешиванием их с сырыми. Данную смесь можно рассматривать как двухкомпонентную, состоящую из нагретых сырых и рециркулирующих семян. Поэтому исследование влияния отдельных факторов на кинетику процесса сушки двухкомпонентной смеси семян представляет практический интерес.

В шахтных рециркуляционных зерносушилках тепловлагообмен между предварительно нагретыми влажными и частично просушенными рециркулирующими

семенами осуществляется в бункере-тепловлагообменнике. Влияние продолжительности тепловлагообмена на кинетику процесса сушки представлено на рисунках 6 и 7.

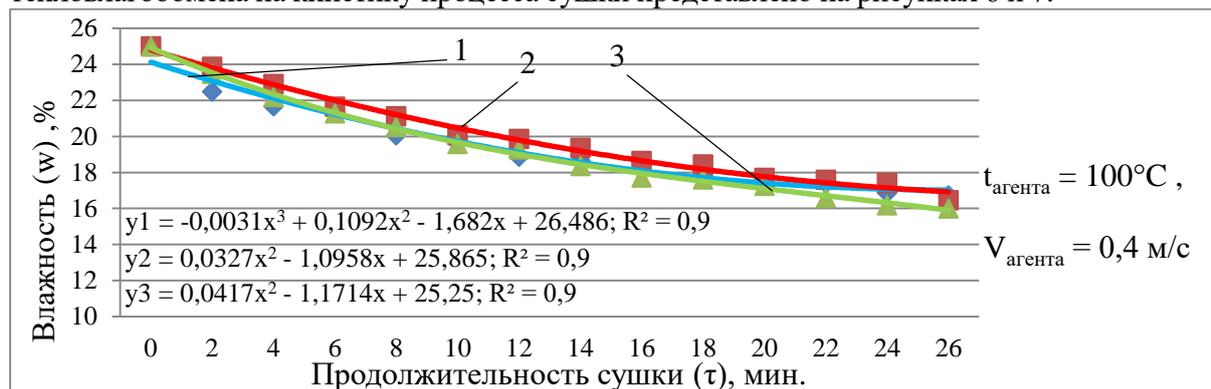


Рисунок 6 – Зависимости влажности смеси семян рапса от продолжительности контактного тепловлагообмена: 1 – при продолжительности 10 мин., 2 – при продолжительности 20 мин., 3 – при продолжительности 30 мин.

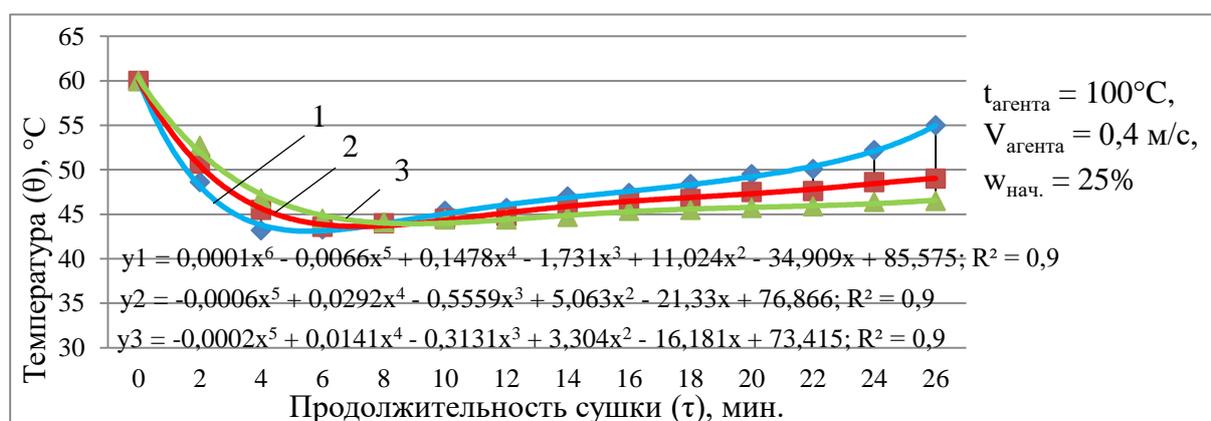


Рисунок 7 – Зависимости температуры смеси семян рапса от продолжительности контактного тепловлагообмена: 1 – при продолжительности 10 мин., 2 – при продолжительности 20 мин., 3 – при продолжительности 30 мин.

Из графиков, представленных на рисунке 6, следует, что максимальная скорость сушки на начальных этапах процесса наблюдается в опыте со смесью семян, подвергшихся 10 минутному тепловлагообмену. Но далее, по ходу протекания процесса, скорость сушки замедляется и становится ниже, чем у семян после 20 и 30 минутного тепловлагообмена. По данным, представленным на графиках рисунка 7, высокая скорость сушки на начальных этапах процесса приводит к более интенсивному охлаждению семян – на 17°C в течение первых 4 минут сушки.

В случае увеличения длительности контактного тепловлагообмена, часть влаги, находящейся на поверхности сырых семян, частично поглощается сухими семенами. Данное заключение подтверждается тем, что после испарения влаги с поверхности семян, подвергшихся 10-минутному контактному тепловлагообмену, происходит интенсивное увеличение температуры и замедление скорости сушки семян. При этом сушка семян после 20 и 30 минутного тепловлагообмена характеризуется более медленным повышением температуры и более высокой скоростью сушки на заключительных этапах процесса.

В экспериментах с большей длительностью контактного тепловлагообмена продолжительность охлаждения увеличивается до 6-10 минут. Температура семян также снижается на меньшие значения – $15,5^{\circ}\text{C}$ – 16°C . Это происходит вследствие того, что в начале тепловлагообмена влага в семенах успевает переместиться к поверхности семени, но не успевает адсорбироваться сухими семенами. Следовательно, начальная стадия процесса сушки характеризуется активным испарением влаги из поверхностных слоёв семян. Это, в свою очередь, вызывает интенсивное снижение их температуры.

Полученные данные свидетельствуют о том, что отмеченная ранее закономерность снижения температуры однородных по влажности семян проявляется и при сушке двухкомпонентной семенной смеси. Снижение влажности при сушке семян со средневзвешенной влажностью около 25% составило от 6,5 до 11%, что подтверждает эффективность применения квазиизотермических режимов при сушке семян рапса с высокой начальной влажностью.

2.2.3 Влияние режимов охлаждения на кинетику процесса охлаждения семян рапса после сушки

Необходимость изучения процесса охлаждения семян рапса обусловлена как возможностью охлаждения семян с повышенной влажностью в прямоточных шахтных зерносушилках, так и промежуточным охлаждением семян в рециркуляционных зерносушилках. Основная цель исследования процесса охлаждения семян рапса заключалась в изучении влияния температуры и скорости охлаждающего воздуха, влажности нагретых семян на интенсивность их сушки и охлаждения.

На рисунках 8 и 9 отображены результаты исследования влияния температуры охлаждающего воздуха на процесс охлаждения семян.

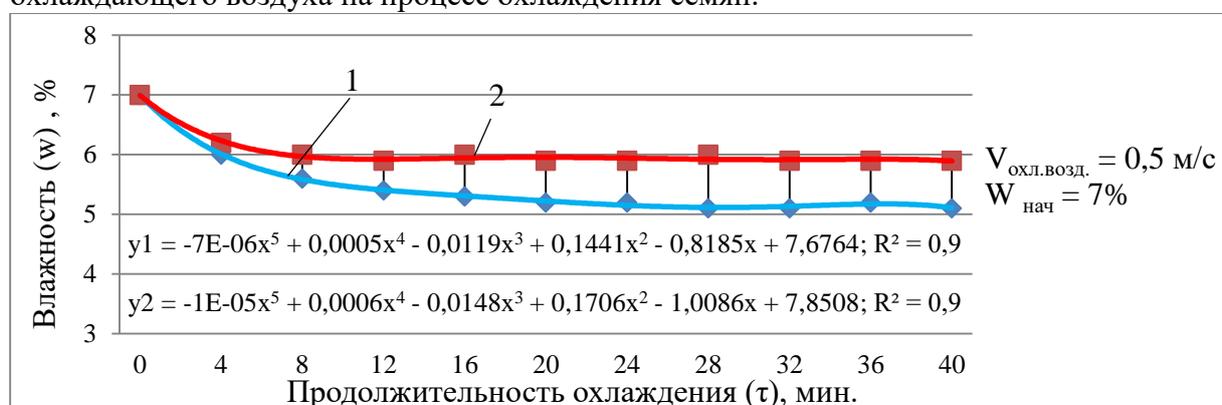


Рисунок 8 – Зависимости влажности семян рапса от температуры охлаждающего воздуха: 1 – при температуре 30°C; 2 – при температуре 20°C.

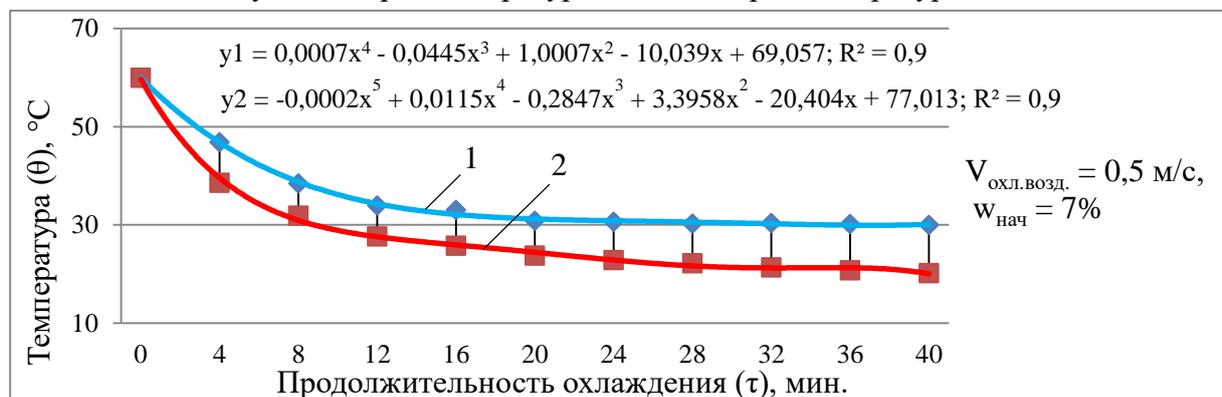


Рисунок 9 – Зависимости температуры семян рапса от температуры охлаждающего воздуха: 1 – при температуре 30°C; 2 – при температуре 20°C.

Проведя анализ результатов опытов, представленных на рисунках 8 и 9, можно сформулировать следующий вывод: несмотря на то, что семена охлаждались более интенсивно при более низкой температуре охлаждающего воздуха, общая длительность процесса увеличивалась на 10 минут, что составляет 25% от общей продолжительности охлаждения. Это вызвано снижением длительности процесса сушки (согласно рисунку 8), которая была более чем в два раза меньше, чем в эксперименте с повышенной температурой охлаждающего воздуха.

Также были проведены опыты по исследованию влияния начальной влажности семян рапса и скорости охлаждающего воздуха на кинетику охлаждения семян.

Анализ полученных результатов показывает, что увеличение скорости охлаждающего воздуха способствует интенсификации сушки при охлаждении влажных семян, а при охлаждении сухих семян разница в снижении влажности незначительна.

Аналогично опытам по сушке семян была проведена серия экспериментов по охлаждению двухкомпонентной смеси семян рапса с различной начальной влажностью. Связано это с тем, что в действующих рециркуляционных зерносушилках семена рапса в зонах сушки и охлаждения представляют собой именно двухкомпонентную семенную смесь, состоящую из нагретых сырых и рециркулирующих семян.

Результаты опытов по охлаждению однородных по влажности семян рапса и двухкомпонентной смеси представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты опытов по изучению изменения температуры и влажности однородных семян рапса и двухкомпонентной смеси после 20 минутного теплообмена при их продувании атмосферным воздухом

Режимы охлаждения	Однородные по влажности семена				Двухкомпонентная смесь			
	Температура, °С		Влажность, %		Температура, °С		Влажность, %	
	нач.	кон.	нач.	кон.	нач.	кон.	нач.	Кон.
$V_{\text{охл.в.}}=0,2 \text{ м/с,}$ $t_{\text{охл.в.}}=25^{\circ}\text{C}$	60	31,5	7	5,7	60	30,6	8	6,5
$V_{\text{охл.в.}}=0,6 \text{ м/с,}$ $t_{\text{охл.в.}}=25^{\circ}\text{C}$	60	25,6	7	5,5	60	24,4	8	6,2
$V_{\text{охл.в.}}=0,5 \text{ м/с,}$ $t_{\text{охл.в.}}=25^{\circ}\text{C}$	60	25,0	14	11,7	60	23,9	14	11,4

Двухкомпонентная смесь в опытах с влажностью смеси семян равной 8% состояла из семян рапса с начальной влажностью 14% и 7%, смешанных в пропорции 1 к 6 и увлажненных в соответствии с ГОСТ Р 8.581-2001. Двухкомпонентная смесь, влажность которой составляла 14%, состояла из семян рапса с начальной влажностью 28% и 7% и смешанных в пропорции 2 к 1.

По полученным данным можно сделать вывод, что сушка двухкомпонентной смеси семян после предварительного теплообмена в течение 20 минут способствует более интенсивному снижению температуры и влажности семян. Однородные по влажности семена охлаждались до температуры, превышающей температуру охлаждающего воздуха на 5°С в течение 16-26 минут, тогда как двухкомпонентная семенная смесь достигала аналогичной температуры за 10-20 минут. Снижение влажности у двухкомпонентной смеси семян также происходит интенсивнее, в сравнении с однородными семенами – 1,5-2,6% против 1,3-2,3% соответственно.

Таким образом, предварительный теплообмен смеси нагретых семян перед охлаждением способствует повышению эффективности сушки и охлаждения данных семян.

2.2.4 Влияние режимов конвективной сушки на качественные характеристики высушиваемых семян рапса при системном взаимодействии сушильного агента и объекта сушки

К качественным показателям семян рапса в первую очередь относится всхожесть, так как снижение данного показателя свидетельствует о действии негативных процессов в белковом и липидном комплексах, сокращении энзимной активности и разрушении витаминов.

Также к качественным показателям относится кислотное число масла, так как оно характеризует жирнокислотный состав липидов семян. Рост кислотного числа масла свидетельствует о разрушении триглицеридов с образованием свободных жирных кислот.

Результаты исследований продемонстрировали, что наибольшее снижение влажности семян рапса за цикл сушки при квазиизотермических режимах наблюдается при температуре агента сушки 120°С и его скорости от 0,4 до 0,6 м/с. Однако сушка семян

при данных режимах характеризуется быстрым достижением максимальной температуры их нагрева. Процесс сушки при данных режимах контролировать достаточно сложно, что приводит к снижению качественных показателей высушиваемых семян.

Результаты опытов по изучению влияния скорости и температуры агента сушки, и температуры нагрева семян на всхожесть семян рапса, представленные в таблице 2, свидетельствуют о том, что максимальное сохранение всхожести рапса достигается при сушке агентом, температура которого не превышает 80°C.

Таблица 2 – Результаты анализа влияния температуры и скорости агента сушки, а также температуры нагрева семян на всхожесть семян рапса

Ско- рость сушил- ного агента, м/с	Температура сушильного агента, °С							
	Начальная (контроль)		80		100		120	
	Темпера- тура предвари- тельно нагретых семян, °С	Всхо- жесть, %	Темпера- тура семян, °С	Всхо- жесть, %	Темпера- тура семян, °С	Всхо- жесть, %	Темпера- тура семян, °С	Всхо- жесть, %
Нач.	60	84	-	-	-	-	-	-
0,2	-	-	44	84	51	80	55	80
0,4	-	-	55	81	58	79	60	76
0,6	-	-	59	79	63	71	68	62

Начальное значение температуры предварительно нагретых семян составило 60°C. Дальнейшее значение температуры семян рапса определяли после их сушки в течение 26 минут.

По результатам данных, приведенных в таблице 2, можно сделать заключение о том, что на сохранение семенных достоинств семян рапса влияют как температура нагрева семян, так и скорость сушильного агента. Всхожесть семян рапса резко снижается при нагреве семян выше 60°C, что обусловлено денатурацией белков зародыша, а также окислительным распадом и связыванием липидов.

В ходе анализа влияния температуры агента сушки на кинетику сушки семян рапса также провели ряд опытов по определению влияния температуры нагрева семян на изменение кислотного числа масла, получаемого из таких семян. Исследования проводили при скорости сушильного агента 0,4 м/с и начальной влажности семян 13%. Продолжительность нагрева составила 26 минут.

Данные, представленные в таблице 3, свидетельствуют о том, что с ростом температуры нагрева семян рапса происходит незначительное увеличение кислотного числа – на 6% при повышении температуры нагрева семян на 5°C. Данный эффект обусловлен ферментной активностью липазы, которая способствует гидролизу жиров с образованием свободных жирных кислот: стеариновой, пальмитиновой, линоленовой и т.д. При этом все полученные показатели соответствуют требованиям ГОСТ 31759-2012 на рапсовое масло.

Таблица 3 – Результаты опытов по анализу влияния температуры сушильного агента и температуры нагрева семян на кислотное число липидов

№	Температура агента сушки, °С	Температура нагрева семян, °С	Кислотное число масла, мг КОН/1г на АСВ
1	Контроль	-	2,24
2	80	54,5	2,71
3	100	58	2,80
4	120	60	2,87

На основании представленных данных можно сделать вывод о том, что изменение качественных характеристик семян рапса в процессе их системного взаимодействия с агентом сушки зависит от режимов их сушки (температуры нагрева семян, температуры и скорости сушильного агента) – чем они выше, тем более низкими качественными показателями характеризуются высушенные семена.

2.2.5 Математическая модель зависимости температуры и влажности высушиваемых семян рапса от режимов их сушки и охлаждения

По результатам лабораторных исследований установили, что предпочтительными параметрами сушки семян рапса являются: температура сушильного агента 80°C, скорость сушильного агента 0,4-0,6 м/с, максимальная температура нагрева семян 60°C. При данных параметрах достигается максимальное снижение влажности (до 6,3%) при наименьших качественных потерях (всхожесть, энергия прорастания и кислотное число) высушиваемых семян. При охлаждении семян целесообразно предусматривать предварительный теплообмен между партиями семян с различной начальной влажностью. Скорость охлаждающего воздуха должна составлять не менее 0,5 м/с, продолжительность охлаждения – не менее 20 минут, так как при данных параметрах обеспечивается охлаждение семян до значений близких к показателям атмосферного воздуха.

Проведенная математическая обработка экспериментальных результатов позволила выявить зависимости, выраженные уравнениями регрессии на представленных выше графиках (рис. 2-9).

На основании данных уравнений возможно определить функцию y в виде многочлена, коэффициенты которого зависят от режимных параметров процесса:

$$y = a_5(\theta, w, V, T)x_5 + a_4(\theta, w, V, T)x_4 + \dots + a_0(\theta, w, V, T), \quad (1)$$

где: y – искомое значение по оси ординат, которое в зависимости от исследуемых параметров отражают либо температуру высушиваемых семян (°C), либо их влажность (%);

x – продолжительность сушки/ охлаждения, мин.;

θ – температура сушильного агента/ охлаждающего воздуха, °C;

w – начальная влажность высушиваемых семян, %;

V – скорость сушильного агента/ охлаждающего воздуха, м/с;

T – продолжительность теплообмена, мин.;

a – коэффициент, определяемый в виде полинома второй степени по формуле:

$$a_k(\theta, w, V, T) = b_0 + b_1\theta + b_2w + b_3V + b_4T + b_5\theta^2 + b_6\theta w + b_7\theta V + b_8\theta T + b_9w^2 + b_{10}wV + b_{11}wT + b_{12}V^2 + b_{13}VT + b_{14}T^2, \quad (2)$$

Таким образом, в случае, если известны основные параметры процесса сушки при квазиизотермических режимах, такие как температура и скорость сушильного агента, влажность семян и продолжительность теплообмена, то используя представленные выше уравнения можно вычислить ориентировочные значения температуры и влажности высушиваемых семян рапса в определённый период их сушки и охлаждения.

2.2.6 Разработка технологии рециркуляционной сушки высоковлажных семян рапса на основе применения квазиизотермических режимов

Предложенная автором технологическая схема производственной установки предназначена для сушки высоковлажных семян рапса, представлена на рисунке 10.

Принципиальное отличие предложенной технологии от общепринятой рециркуляционной сушки при осциллирующих режимах заключается в подаче в верхнюю зону напорно-распределительной камеры теплоносителя, нагретого до температуры ок. 80 °C, а не охлаждающего воздуха. В нижние же секции шахт подаётся атмосферный воздух, за счёт чего там происходит охлаждение семян до требуемой температуры.

Особенность квазиизотермических режимов, при которых осуществлялась сушка семян рапса в рассматриваемой зоне зерносушилки, состоит в характерном изменении температуры семян в течение процесса. Вначале процесса температура семян снижается,

и после определённого времени сушки начинает возрастать, обеспечивая условное равенство температурных значений на начальной и конечной стадиях процесса сушки.

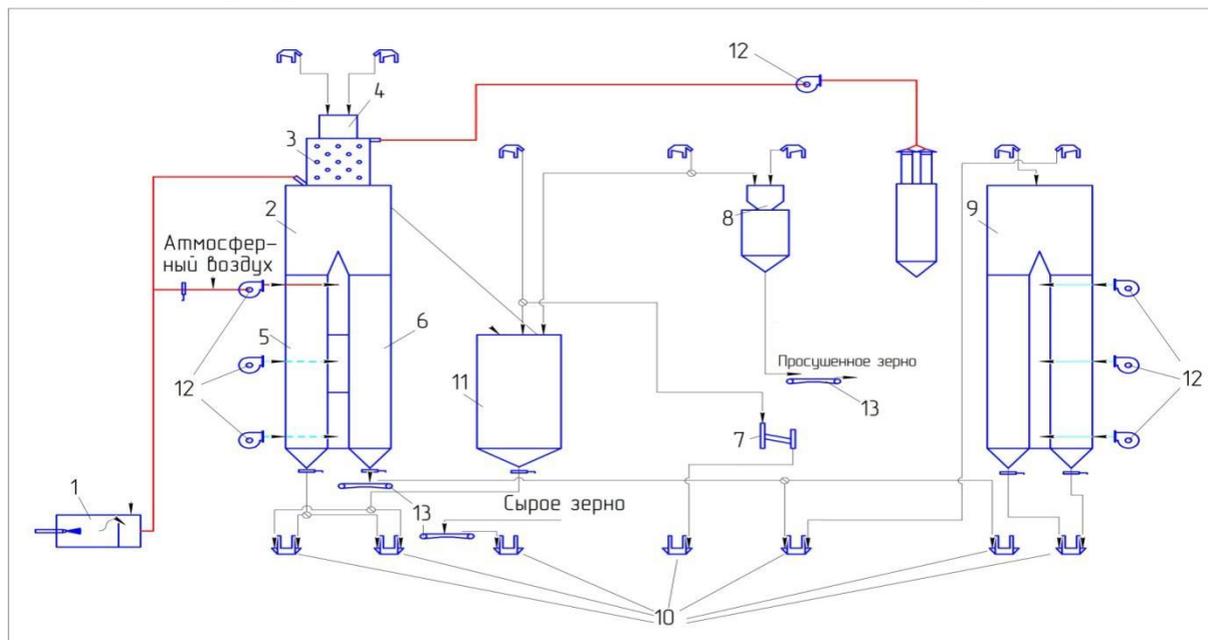


Рисунок 10 – Технологическая схема производственной установки, работающей по принципу предварительного нагрева семян с дополнительной подачей сушильного агента в верхнюю зону напорно-распределительной камеры:

1 – топка; 2 – бункер-тепловлагообменник; 3 – камера предварительного нагрева семян; 4 – надсушильный бункер; 5 – рециркуляционная шахта; 6 – шахта охлаждения; 7 – воздушно-ситовой сепаратор; 8 – порционные весы; 9 – отдельная шахта дополнительного охлаждения; 10 – нории; 11 – оперативный бункер; 12 – вентиляторы; 13 – ленточные транспортеры.

В качестве сушильного агента используется смесь атмосферного воздуха и топочных газов.

Дополнительная подача агента сушки в верхнюю секцию напорно-распределительной камеры обеспечивается за счет подвода воздуховода к вентилятору 1 ступени. Для регулировки температуры сушильного агента в воздуховоде монтируется шиберная задвижка. С целью контроля температуры сушильного агента в воздуховоде устанавливается термопара, подключенная к общей системе автоматизированного контроля режимов сушки.

3 Практическая реализация результатов исследований

В данной главе описаны результаты промышленной апробации предложенной технологии рециркуляционной сушки семян рапса при квазиизотермических режимах.

3.1 Разработка нормативно-технической документации и апробация в производственных условиях разработанной технологии рециркуляционной сушки высоковлажных семян рапса

Были разработаны и утверждены технические условия ТУ 9721215-00946257-2016 на рециркуляционную сушку семян рапса при квазиизотермических режимах.

В ходе проведения испытаний было просушено более 300 тонн рапса.

Основным целевым назначением высушиваемого рапса являлось применение его в качестве сырья для получения растительного масла и рапсового жмыха с последующим их использованием при производстве полнорационных комбикормов для сельскохозяйственных животных и птицы.

Семена рапса, которые использовались при проведении опытов, поступали с полей Азнакаевского, Сармановского, Заинского и Тукаевского районов Республики Татарстан в период уборки урожая 2013 года. Уборка семян рапса происходила методом прямого комбайнирования, что объясняет повышенную влажность (до 27%) и сорность (до 26%) поступающих на сушку семян рапса.

Результаты производственных испытаний (приведены в таблице 4) показали, что обеспечение сушки при квазиизотермических режимах в верхней зоне рециркуляционной и охладительной шахт способствует повышению производительности зерносушилки ориентировочно на 25%, в сравнении с общепринятым способом рециркуляционной сушки. Также более чем в два раза снижается кратность смешения сырых и рециркулирующих семян. Это достигается за счет существенного увеличения объема испаряемой влаги за цикл сушки.

Таблица 4 – Результаты производственных испытаний сушки высоковлажных семян рапса

№	Влажность семян, %		Температура агента сушки, °С		Температура атм. воздуха, °С	Производительность, пл. т/час	Кратность смешения сырых и рециркулирующих семян
	Начальная	Конечная	На входе в камеру нагрева	На входе в верхнюю зону			
Сушка с частичной рециркуляцией просушенных семян							
1	15,4	6,8	300	-	29	22,7	2,9
2	22,0	7,0	300	-	26	22,5	6,8
3	27,0	6,8	300	-	32	21,9	7,3
4	19,6	6,9	300	-	24	19,3	5,9
5	24,9	7,0	300	-	30	22,9	6,7
6	23,4	7,1	300	-	27	18,8	7,5
сред.	22	6,9	300	-	28	21,3	6,1
Сушка при квазиизотермических режимах							
1	15,1	7,2	260	80	29	27,6	0,5
2	23,5	6,9	260	80	26	27,7	3,0
3	25,0	6,8	260	80	32	28,2	2,8
сред.	21,2	7,0	260	80	29	27,8	1,8

Результаты исследования влияния режимов сушки семян рапса на их основные качественные характеристики и на характеристики получаемого из них масла приведены в таблице 5.

На основе проведенных исследований было установлено, что при заданных параметрах, в случае сушки при осциллирующих режимах, семена рапса влажностью от 15 до 27% просушиваются до требуемых значений при смешении сухих и рециркулирующих семян в пропорции (кратности) от 3 до 7,5 к 1. В случае сушки аналогичных по влажности семян при квазиизотермических режимах данная пропорция составила от 0,5 до 3 к 1.

При применении рециркуляционной сушки снижение всхожести и энергии прорастания семян рапса составляет около 30%, снижение кислотного числа масла – около 16%, а увеличение перекисного числа - около 10%. Сушка при квазиизотермических режимах обеспечивает более щадящее воздействие на семена: всхожесть и энергия прорастания снижаются в среднем на 20%, кислотное число масла снижается в среднем на 19%, перекисное число увеличивается на 8%.

Одним из основных параметров качества семян рапса продовольственного назначения является определение остаточного содержания в них бензапирена, являющегося одним из продуктов сгорания углеводородов и относящегося к веществам 1 (высшего) класса

опасности. По результатам проведенных анализов остаточное содержание данного вещества в просушенных семенах, как в случае рециркуляционной сушки при осциллирующих режимах, так и в случае сушки при квазиизотермических режимах не обнаружено.

Таблица 5 – Результаты сравнительных исследований влияния режимов сушки на основные качественные характеристики семян рапса и извлекаемого из них масла

№	Макс. темп. нагр. семян, °С	Кратность смеш-я сырых и рец-х семян	Температура сушильного агента, °С		Кислотное число масла, мг КОН/1г на АСВ		Перекисное число масла, ммоль/кг 1/2 O		Всхожесть, %		Энергия прораст-я, %	
			На входе в кам. нагрева	На входе в верх. зону сушки	До суш-ки	После суш-ки	До суш-ки	После суш-ки	До суш-ки	После суш-ки	До суш-ки	После суш-ки
Сушка с частичной рециркуляцией просушенных семян												
1	60	2,9	300	-	3,76	2,96	5,52	6,55	65	55	57	49
2	60	6,8	300	-	3,31	2,9	6,61	8,02	56	38	44	29
3	60	7,3	300	-	3,5	2,91	7,74	9,18	45	26	41	24
4	60	5,9	300	-	3,42	2,82	6,43	7,68	60	43	54	40
5	60	6,7	300	-	3,67	3,05	6,96	8,34	53	33	49	31
6	60	7,5	300	-	3,41	2,98	6,33	7,82	57	38	48	32
Ср.	60	6,1	300	-	3,51	2,94	6,60	7,93	56	39	49	34
Сушка при квазиизотермических режимах												
1	60	0,5	260	80	3,81	2,9	5,21	6,12	63	57	56	51
2	60	3,0	260	80	3,32	2,82	6,53	7,48	53	42	41	31
3	60	2,8	260	80	3,5	2,88	8,84	9,95	46	33	41	29
Ср.	60	1,8	260	80	3,54	2,87	6,86	7,85	54	44	46	37

Также были проведены исследования по определению содержания в масле, получаемом из высушиваемых семян, токсичной эруковой кислоты. По результатам исследований рапсового масла данная кислота в нём не была обнаружена, что подтверждает возможность его безопасного использования в качестве пищевого и кормового продукта.

Выход масла при холодном отжиме семян, сушка которых осуществлялась при квазиизотермических режимах, аналогичен показателям, полученным при отжиме семян, высушенных с частичной рециркуляцией просушенных семян по «классической» технологии рециркуляционной сушки, и составил 34%.

Таким образом сушка семян рапса при квазиизотермических режимах обеспечивает повышенную сохранность основных товарных качеств высушиваемых семян. Это достигается за счёт снижения теплового воздействия на семена вследствие сокращения кратности их рециркуляции.

Во всех проведенных экспериментах наблюдалось эффективное охлаждение семян рапса – их температура на выходе из охладительной шахты не превышала температуру окружающего воздуха более чем на 1-2°С. Данных результатов удалось достичь путём увеличения объёма охлаждающего воздуха, направляемого в зоны охлаждения, до 3,5 м³/кг х ч.

В данном разделе проанализированы основные качественные характеристики семян рапса, полученные в производственных условиях, при их системном взаимодействии с агентом сушки: всхожесть и энергия прорастания высушиваемых семян, а также кислотное и перекисное числа получаемого из них масла. По результатам проведенного анализа установлено, что сушка при квазиизотермических режимах обеспечивает их более высокую сохранность.

3.2 Анализ технико-экономической эффективности применения разработанной технологии рециркуляционной сушки семян рапса при квазиизотермических режимах

Расчет и обоснование предпочтительных технико-экономических параметров сушки семян рапса целесообразнее всего было проводить на зерносушилках различного принципа работы. С этой целью при расчете экономической эффективности осуществлялось сравнение основных показателей работы зерносушилок, работающих по принципу шахтной прямоточной, «классической» рециркуляционной сушки с предварительным нагревом семян и последующим охлаждением атмосферным воздухом и рециркуляционной сушки семян рапса при квазиизотермических режимах.

Расчет технико-экономической эффективности производился в соответствии с общепринятой методикой оценки инвестиционных проектов, а также на основании общей справочной информации по зерносушильной технике. Итоговые результаты расчета приведены в таблице 6.

Таблица 6 - Результаты расчета технико-экономической эффективности рециркуляционной сушки при квазиизотермических режимах

Тип зерносушилки	ДСП -24 СН (шахтная прямоточная)	Целинная-36 на базе ДСП-24 СН (рециркуляционная)	Рециркуляционная с дополнительной подачей тепла в верхнюю зону сушки
Затраты на сушку, руб./пл. т	154,97	112,16	100,01

Результаты расчёта подтвердили экономическую целесообразность перевода шахтных зерносушилок на рециркуляционный режим, а рециркуляционных зерносушилок – на сушку семян рапса при квазиизотермических режимах.

Выводы

1. Исследовано влияние режимов конвективной сушки семян рапса на кинетику процесса сушки однородных по влажности семян. Установлено, что при сушке однородных по влажности семян рапса, с ростом температуры сушильного агента с 80°C до 120°C продолжительность сушки сокращается в среднем в 2 раза; с ростом скорости сушильного агента с 0,2 м/с до 0,6 м/с – в среднем в 3 раза. При повышении начальной влажности нагретых семян выше 20% общее снижение влажности высушиваемых семян возрастает в среднем с 6% до 9%.

2. Доказано, что сушка смеси семян рапса с различной начальной влажностью протекает более интенсивно в сравнении с процессом сушки однородных по влажности семян. Установлено, что при повышении температуры сушильного агента с 80°C до 120°C продолжительность сушки сокращается на 65%, при увеличении скорости сушильного агента с 0,2 м/с до 0,6 м/с – на 70%. Увеличение продолжительности контактного тепловлагообмена между семенами с различной начальной влажностью с 10 до 30 минут приводит к увеличению продолжительности сушки на 23%.

3. Установлено, что охлаждение семян рапса после их сушки происходит быстрее у семян с более высокой влажностью; с увеличением скорости охлаждающего воздуха с 0,2 м/с до 0,6 м/с скорость охлаждения семян также возрастает в среднем на 10-20%, в зависимости от начальной влажности семян, а длительность охлаждения снижается в 2-3 раза; при охлаждении семян воздухом температурой 20°C общая продолжительность охлаждения семян до значений близких к температуре охлаждающего воздуха повышается в среднем на 10 минут, что составляет 25% от общей длительности процесса, в сравнении с воздухом температурой 30°C.

4. Установлено, что при системном взаимодействии сушильного агента и объекта сушки, режимы сушки оказывают непосредственное влияние на качественные

характеристики последнего: с повышением температуры нагрева семян и возрастанием интенсивности их сушки, качественные технологические и семенные показатели семян рапса снижаются. Всхожесть семян рапса снижается от 3 до 10% при нагреве семян выше 50°C и от 15 до 27% при нагреве семян до температур в интервале от 60 до 70°C, что объясняется денатурацией белков зародыша. С ростом температуры нагрева семян рапса происходит увеличение кислотного числа – на 6% при повышении температуры нагрева семян на 5°C. Данный эффект обусловлен термическим распадом триглицеридов с образованием низкомолекулярных кислот.

Выявлено, что приемлемая сохранность качественных показателей высушиваемых семян рапса достигается при сушке агентом температурой не более 80°C, скоростью не более 0,4 м/с и при температуре нагрева высушиваемых семян не более 60°C.

5. Впервые разработана математическая модель зависимости характеристик высушиваемых семян рапса от режимов их сушки и охлаждения, позволяющая определить значения температуры и влажности семян в определённый период их сушки и охлаждения.

6. Разработана технология рециркуляционной сушки высоковлажных семян рапса при квазиизотермических режимах, обеспечивающая повышенное сохранение показателей качества высушиваемых семян. Установлено, что количество циклов рециркуляции сокращается при данном способе сушки от 2 до 5 раз, по сравнению с рециркуляционными зерносушилками, работающими по принципу сушки предварительно нагретых семян атмосферным воздухом. Это обеспечивает сокращение термического воздействия на высушиваемые семена, а также способствует более рациональному расходованию теплоносителя.

7. Впервые разработаны технические условия на рециркуляционную сушку семян рапса при квазиизотермических режимах.

Установлено, что при использовании разработанной технологии в производственных условиях её применение увеличивает производительность зерносушилки ориентировочно на 25% и обеспечивает более высокую (в среднем на 15%) сохранность качественных показателей.

8. Установлено, что годовая экономия от перевода рециркуляционной зерносушилки на сушку семян рапса при квазиизотермических режимах составляет 1 266 тыс. рублей. Срок окупаемости составляет менее одного года.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Публикации в журналах, рекомендуемых ВАК при Минобрнауки РФ:

1. Резчиков, В. А. Совершенствование технологии сушки зерна рапса / В. А. Резчиков, **А. И. Урманов** // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2015. – №6. – С. 49–52.

2. Резчиков, В. А. Сушка семян рапса с высокой влажностью / В. А. Резчиков, **А. И. Урманов** // Хлебопродукты. – 2015. – №4. – С. 55–57.

3. Резчиков, В. А. Особенности сушки семян рапса и возможности повышения её эффективности / В. А. Резчиков, **А. И. Урманов** // Проблемы развития АПК Региона. – 2020. – №1. – С. 209–217.

4. **Урманов, А. И.** Применение масла из семян рапса конвективной сушки при фритюрной обработке продуктов / А. И. Урманов, Г. Г. Дубцов, И. У. Кусова, Т. Р. Любецкая // Хлебопродукты. – 2020. – №12. – С. 44–46.

5. Щетинин, М. П. Технологические решения, обеспечивающие повышение эффективности сушки высоковлажных семян рапса / М. П. Щетинин, **А. И. Урманов** // Проблемы развития АПК Региона. – 2022. – №1. – С. 179–188.

6. Щетинин, М. П. Моделирование и математическая обработка результатов опытов по сушке семян рапса / М. П. Щетинин, **А. И. Урманов** // Ползуновский вестник. – 2023. – №2. – С. 131–135.

Публикации в журналах и сборниках трудов конференций:

1. **Урманов, А. И.** Совершенствование технологии сушки зерна высоковлажного рапса / А. И. Урманов, В. А. Резчиков // Сборник материалов XI научно-практической конференции «Технологии и продукты здорового питания. Функциональные пищевые продукты». – Москва. – 2013. – С. 112–115.
2. **Урманов, А. И.** Повышение эффективности сушки зерна рапса // Ученые записки, Казанской государственной академии ветеринарной медицины им. Н.Э. Баумана. – 2014. – № 219 – С. 210–213.
3. **Урманов, А. И.** Повышение эффективности сушки зерна высоковлажного рапса // Сборник статей Международной научно-практической конференции «Тенденции развития технических наук». – Уфа. – 2014. – С. 73–76.
4. **Урманов, А. И.** Совершенствование технологии сушки зерна рапса // Сборник статей Международной научно-практической конференции «Современные концепции развития науки». – Уфа. – 2014. – С. 85–88.
5. **Урманов, А. И.** Специфика сушки зерна рапса // Сборник статей Международной научно-практической конференции «Современное состояние и перспективы развития технических наук». – Уфа. – 2014. – С. 52–55.
6. **Урманов, А. И.** Повышение эффективности сушки рапса / А. И. Урманов, В. А. Резчиков // Материалы международной заочной конференции «Проблемы современной аграрной науки», ФГБОУ ВПО «КрасГАУ». – Красноярск. – 2015. – С. 199–201.
7. **Урманов, А. И.** Квазиизотермическая сушка зерна рапса // Сборник статей Международной научно-практической конференции «Теоретические и практические вопросы науки XXI века». – Уфа. – 2015. – С. 11–16.
8. **Урманов, А. И.** Перспективы выращивания и переработки семян рапса // Сборник научных трудов по материалам XIX международной научно-практической конференции «Наука России: Цели и задачи». – Екатеринбург. – 2020. – С. 30–33.
9. **Урманов, А. И.** Перспективы выращивания и переработки семян рапса // А. И. Урманов, М. П. Щетинин // Сборник статей III Всероссийской научно-практической конференции «Стратегия современного научно-технологического развития: проблемы и перспективы реализации». – Петрозаводск. – 2021. – С. 44–50.

Патенты на изобретения:

1. Пат. 2812479 Российская Федерация, МПК А 23 В 9/08. Способ сушки семян рапса при квазиизотермических режимах / **Урманов А. И.**, Щетинин М. П., Щетинина Е. М.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ)» – № 2022127541 ; заявл. 24.10.2022 ; опубл. 30.01.2024, Бюл. № 4. – 7 с.

Summary

There was carried out a study of processes and regularities of quasiisothermal rapeseed drying. The technology of recirculated-quasiisothermal rapeseed drying as well as optimum performance providing significant intensification of the process without sacrificing main qualitative characteristics were developed on the basis of obtained data. These results are achieved due to efficient use of heat input, which is mostly consumed for water evaporation.

Условные обозначения

$V_{\text{агента}}$ – скорость сушильного агента, м/с;

$W_{\text{нач}}$ – начальная влажность семян, %;

$t_{\text{агента}}$ – температура сушильного агента, °С;

$V_{\text{охл.возд}}$ – скорость охлаждающего воздуха, м/с.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность д.т.н. профессору **В.А. Резчикову** д.т.н. профессору **Г.Г. Дубцову** и д.т.н. профессору **С.В. Савченко** за оказанную помощь при выполнении диссертационной работы.