

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«КУБАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ И.Т.ТРУБИЛИНА»

На правах рукописи



Харченко Сергей Николаевич

***ЭФФЕКТИВНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ СУШИЛЬНОЙ
УСТАНОВКИ ПЧЕЛИНОЙ ПЕРГИ С РАЦИОНАЛЬНЫМИ
ПАРАМЕТРАМИ КОМБИНИРОВАННОГО НАГРЕВА***

Специальность: 05.20.02 – Электротехнологии и электрооборудование
в сельском хозяйстве

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор Оськин С.В.

Краснодар – 2022

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1 АНАЛИЗ СПОСОБОВ СУШКИ ПЧЕЛИНОЙ ПЕРГИ.....	9
1.1 Качество пчелиной перги при её сушке и факторы на него влияющие.....	9
1.2 Существующее оборудование для сушки сельскохозяйственных продуктов и его особенности	12
1.3 Современное оборудование и исследования в области сушки пчелиной перги.....	15
1.4 Проблемы теоретического описания и моделирования процессов в конвективных установках для сушки перги.....	29
1.5 Выводы и задачи исследований.....	34
2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- И ВЛАГОПЕРЕНОСА В СУШИЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ С КОМБИНИРОВАННЫМ НАГРЕВОМ	37
2.1 Определение способов интенсификации удаления влаги из гранулированной пчелиной перги и увеличения равномерности сушки во всём объёме сушильной камеры	37
2.2 Математические модели тепло- и влагопереноса в сушильной установке с комбинированным нагревом	49
2.3 Выводы по главе.....	79
3 МЕТОДИКА, РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СУШИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ПЧЕЛИНОЙ ПЕРГИ КОМБИНИРОВАННЫМ НАГРЕВОМ И РАСЧЕТ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЕЁ ВНЕДРЕНИЯ	81
3.1 Методика проведения экспериментальных исследований по подтверждению теоретических положений сушки гранулированной пчелиной перги комбинированным нагревом	81
3.2 Результаты экспериментальных исследований по подтверждению теоретических положений сушки гранулированной пчелиной перги комбинированным нагревом	89
3.3 Расчет экономической эффективности модернизированной сушильной установки при внедрении на пасеке в 100 пчелиных семей	97
3.4 Выводы по главе.....	102
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	104
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	107
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	119

ВВЕДЕНИЕ

Пчеловодство является одной из традиционных и важных отраслей сельского хозяйства страны. На сегодняшний день в ней всё сильнее сказываются экономические проблемы, отрицательно влияющие на её рентабельность. Это связано в первую очередь с применением устаревших технологий содержания пчел и малым использованием первичной переработки продукции с помощью современных технических средств. Поэтому разработка новых экологически чистых и мало затратных технологий переработки продукции пчеловодства является важной задачей для агропромышленного комплекса России.

Одним из энергозатратных видов переработки продукции пчеловодства является сушка перги и пыльцы. Зачастую в условиях малых форм хозяйствования сушка осуществляется конвективным методом, отличающимся большим расходом электрической энергии, длительностью процесса. Тем не менее, данный способ сушки обладает достоинством, выгодно отличающим его от других – простота конструкций сушилок, низкая вероятность испортить продукт и утратить полезные его свойства, что важно для перги и пыльцы богатых витаминами и микроэлементами.

Существует множество исследований посвящённых сушки тех или иных продуктов, в том числе с комбинацией конвективного и инфракрасного нагрева. Продолжаются исследования кинетики сушки для различных материалов. Работа выполнена по планам НИР Кубанского ГАУ ГР № 121031700099 (2021–2025 г.).

Степень разработанности темы. Научные проблемы переработки сельскохозяйственных продуктов, в частности их сушки, исследовались многими отечественными и зарубежными учёными. Такой интерес к ней со стороны научного сообщества возник из-за того, что сушка является одним из энергозатратных процессов АПК. Как правило, многие сельскохозяйственные продукты являются пористыми телами. Разработкой

теории тепло- и влагообмена в коллоидных капиллярно-пористых телах занимались такие учёные как: Коссович П. С., Лебедев А. В., Горячкин В. Г., Кирпичёв М. В., Лыков А. В., Гинзбург А. С. и др. В настоящий момент вопросами развития сушильных установок и их внедрением на предприятиях АПК занимаются учёные: Попов В. М., Афонькина В. А., Вороненко Б. А., Малин Н. И., Завалий А. А., Некрашевич В. Ф., Каширин Д. Е., Винокуров С. В., Мамонов Р. А. и многие другие [2, 73, 13, 12, 49, 50, 24, 25]. Большой вклад в развитие установок облегчающих труд пчеловодов, в том числе сушилок для перги и перговых сот внесли учёные ФГБОУ ВО РГАТУ имени П.А. Костычева (г. Рязань).

Но, несмотря на глубину проводимых исследований задачи сокращения времени сушки, снижения энергозатрат на неё, внедрения и модернизации уже имеющихся сушилок в сельскохозяйственном производстве остаются актуальными и по сей день. В то же время определение эффективных режимов работы и рациональных параметров сушильных установок невозможно без исследования свойств связи влаги с продуктом, которые для пчелиной перги мало известны.

Проблема состоит в следующем. С одной стороны на рынке имеется достаточное количество сушилок для перги и существует много научных работ по исследованию и совершенствованию сушильных установок для этого продукта, но с другой стороны они имеют высокие энергозатраты и часто выходной продукт имеет большой разброс по относительной влажности между лотками в камере и сопровождается длительным временем сушки.

Научная гипотеза. Возможна разработка сушильной установки пчелиной перги с эффективными режимами работы и рациональными параметрами комбинированного нагрева и использования современного ПО для исследования и моделирования внутренних процессов тепло- и влагопереноса.

Цель работы. Обоснование эффективных режимов работы сушильной установки пчелиной перги с рациональными параметрами комбинации конвективного и инфракрасного нагрева для повышения качества продукта и сокращения времени технологического процесса.

Задачи исследования.

1. Определить способы интенсификации удаления влаги из продукта и получения равномерности сушки по всему объёму сушильной камеры.
2. Разработать математические модели процессов тепло- и влагопереноса внутри сушильной камеры вызванных комбинацией конвективного и инфракрасного (ИК) способов нагрева.
3. Определить пористость и проницаемость слоя гранул пчелиной перги, а также изотерму сорбции влаги рассматриваемого продукта.
4. Провести реализацию полученных моделей в программном обеспечении и на их основе обосновать эффективные режимы работы и рациональные параметры комбинированного нагрева в сушильной установке гранул пчелиной перги.
5. Изготовить сушильную установку для гранул пчелиной перги с комбинированным нагревом и провести эксперименты по подтверждению рациональных параметров процесса сушки с эффективными режимами работы.
6. Разработать алгоритм и программу управления для контроллера, а также принципиальную электрическую схему управления сушильной установкой гранул пчелиной перги с комбинированным нагревом.
7. Провести расчет экономической эффективности применения сушильной установки гранул пчелиной перги с комбинированным нагревом.

Объект исследования — сушильная установка пчелиной перги с рациональными параметрами комбинированного нагрева, основные параметры слоя гранулированной пчелиной перги, её сорбционные свойства.

Предмет исследования — зависимости тепло- и влагопереноса внутри сушильной камеры от свойств продукта и агента сушки, а также параметров и режимов работы электрооборудования.

Методы исследования математическое моделирование методом конечных элементов с использованием современного ПО Comsol Multiphysics, законы тепломассообмена, методика проведения экспериментальных исследований.

Научную новизну работы составляют:

- математические модели процессов тепло- и влагопереноса протекающие при комбинированном нагреве внутри сушильной установки;
- зависимости теплофизических характеристик пчелиной перги от параметров и режимов работы комбинированного нагрева;
- эффективные режимы работы сушильной установки гранулированной пчелиной перги и параметры комбинированного нагрева в ней;
- основные физические параметры слоя гранул пчелиной перги и его сорбционные свойства.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в следующем:

- математические модели процессов тепло- и влагопереноса протекающие при комбинированном нагреве и позволяющие описать временные изменения температуры и влажности продукта внутри сушильной камеры;
- зависимости теплофизических характеристик пчелиной перги от параметров и режимов работы комбинированного нагрева, которые дают возможность определить время сушки гранулированной пчелиной перги, эффективные мощности нагревателей и скорости воздушных потоков внутри сушильной камеры, определить рациональный объём гранул в лотке;

- обоснованные эффективные режимы работы и рациональные параметры сушильной установки пчелиной перги для повышения качества продукта и сокращения времени технологического процесса;
- алгоритм и программа управления для контроллера, а также принципиальная электрическая схема управления сушильной установкой гранул пчелиной перги с комбинированным нагревом, которые позволяют управлять установкой в автоматическом режиме;
- регрессионная зависимость равновесного влагосодержания в перге от относительной влажности окружающего её воздуха в виде изотермы сорбции влаги для адекватного моделирования;
- методика определения характеристик пористых продуктов позволяющая получить основные параметры слоя гранул пчелиной перги – пористость и проницаемость.

Реализация результатов исследований. Результаты исследований реализованы в экспериментальных образцах сушильных установок и внедрены в ООО «Предприятие по пчеловодству «Краснодарское» (Краснодарский край). Материалы диссертационной работы используются в учебном процессе на факультете энергетики КубГАУ.

Апробация работы. Основные положения и выводы диссертации доложены и одобрены на ежегодных научных конференциях факультета энергетики КубГАУ (2019–2021 гг.); на Международной научно-практической конференции «Научно-техническое обеспечение АПК Юга России» (2020 г., г. Зерноград), на XIII Международной научно-практической конференции «Новые технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности с использованием электрофизических факторов и озона» (2020 г., г. Ставрополь), на XIV Международной научно-практической конференции «Физико-технические проблемы создания новых технологий в агропромышленном комплексе» (2021 г., г. Ставрополь), на 19-ой Международной научно конференции «Engineering for Rural Development» (2019 г., Латвия, г. Елгава), на 20-ой Международной научно конференции

«Engineering for Rural Development» (2020 г., Латвия, г. Елгава); Материалы исследований были представлены на III этапе Всероссийского конкурса на лучшую научную работу среди студентов, аспирантов и молодых учёных высших учебных заведений Минсельхоза России по номинации «Технические науки».

Публикации результатов работы. По материалам диссертационной работы опубликовано 10 печатных работ, в том числе 3 статьи в журнале, рекомендованном ВАК, и 2 статьи в изданиях, индексируемых в Scopus, 1 патент на изобретение.

На защиту выносятся:

- математические модели процессов тепло- и влагопереноса протекающих внутри сушильной камеры с комбинированным нагревом;
- зависимости теплофизических характеристик пчелиной перги от параметров и режимов работы комбинированного нагрева;
- обоснованные эффективные режимы работы и рациональные параметры сушильной установки пчелиной перги для повышения качества продукта и сокращения времени технологического процесса;
- алгоритм и программа управления для контроллера, а также принципиальная электрическая схема управления сушильной установкой гранул пчелиной перги с комбинированным нагревом.
- регрессионная зависимость равновесного влагосодержания в перге от относительной влажности окружающего её воздуха в виде изотермы сорбции влаги, а также найденные основные параметры, характеризующие слой гранул пчелиной перги, как пористое тело – пористость и проницаемость.
- результаты сопоставления теоретических и экспериментальных данных при работе сушильной установки в конвективном и комбинированном режимах работы.

1. АНАЛИЗ СПОСОБОВ СУШКИ ПЧЕЛИНОЙ ПЕРГИ

1.1 Качество пчелиной перги при её сушке и факторы на него влияющие

Полезные свойства пчелиной перги трудно переоценить. Она полезна не только для пчёл, которые используют её для выращивания своих личинок, но и для человека. По количеству содержания в ней полезных веществ перга в несколько раз превосходит пчелиную пыльцу. В этом продукте пчеловодства содержится множество полезных витаминов (Е, С, D, В1, В2, В3, В6), ферментов и микроэлементов (железо, магний, цинк, селен). Перга оказывает положительное влияние на пищеварительную и эндокринную системы, кожу, улучшает кровообращение, повышает защитные функции организма. Поэтому важно чтобы имеющаяся в продаже перга сохраняла свои свойства.

На рынке пчелиная перга может быть представлена в сотах, в пастообразном виде, а также в гранулах (рис. 1.1).



а)

б)

в)

а) перга в сотах, б) паста из перги и мёда, в) перга в гранулах

Рисунок 1.1 – Изображение видов перги, имеющейся на рынке

В сотах перга занимает половину продукта, остальное это воск и мерва. В пастообразном виде представляет из себя смесь с мёдом, что улучшает её сохранность, но такой продукт имеет плохой товарный вид, а долю перги в

нём сложно определить. Зачастую на рынке можно встретить пергу в виде гранул, которая была очищена от воска и мервы.

Как и любой другой продукт пчеловодства перед тем, как попасть к человеку перга проходит ряд технологических операций, которые могут повлиять на её качество. Одной из важных операций при переработке перги, способствующая её длительному хранению, является сушка. От того на сколько она будет качественно проведена зависит сохранность полезных свойств в продукте. Как правило, сушка перги осуществляется до влажности 14-15% при начальной влажности от 20% и более. Качество пчелиной перги определяется ГОСТ 31776-2012. Согласно ему массовая доля воды в пчелиной перге должна составлять не более 18%. Также из литературных источников известно, что температура сушки пчелиной перги (также как и пчелиной пыльцы, из которой она состоит) не должна превышать 40°C чтобы сохранить её полезные свойства. Температура выше этого значения конечно же существенно сокращает время сушки пчелиной перги, но при этом теряются биологически активные свойства этого продукта [53]. Стоит также отметить, что, несоблюдение температурного режима и использование сушильного агента с высокой температурой приводит не только к потери полезных свойств продукта, но и к появлению корки на его поверхности. К нежелательному также следует отнести неравномерную сушку пчелиной перги.

Основными, по нашему мнению, факторами, влияющими на интенсивность и качество сушки пчелиной перги, помимо температуры, являются: скорость протекания сушильного агента, физические параметры высушиваемого продукта, а также конструкция сушильной камеры.

Скорость сушильного агента влияет на скорость удаления влаги из сушильной камеры. Её малые значения могут привести к скоплению влаги внутри сушильной установки и переувлажнению всего продукта или его части во время сушки. И наоборот высокие значения скорости приводят к быстрому удалению влаги из области сушки, но и к перерасходу

электрической энергии, витанию продукта внутри сушильной камеры. Температура сушильного агента в свою очередь влияет на скорость испарения влаги из продукта [80].

Помимо скорости и температуры, большое влияние на процесс сушки оказывают свойства самого продукта. Среди них можно выделить следующие: теплопроводность, теплоёмкость, плотность. Эти параметры для пчелиной перги были определены С.В. Винокуровым [11].

Таблица 1.1 – Физико-механические свойства гранул перги и восковой основы сотов [11]

Название продукта	Относительная влажность, %	Объёмная масса, кг/м ³	Плотность, кг/м ³
Перга	10,16-21	615,8-688,8	1233,5-1294,9
Восковая основа сотов	0,5-2,3	319,3-332,7	808,9-901,2

Таблица 1.2 – Теплофизические свойства гранул перги и восковой основы сотов [11]

Название продукта	Влажность, %	Температуропроводность, $\alpha \cdot 10^7$ м ² /с	Теплоёмкость, с кДж/(кг·°С)	Теплопроводность, λ Вт/(м·°С)
Перга	13,45-21,18	0,986-1,047	1,884-2,006	0,236-0,259
Восковая основа сотов	0,63-2,72	0,817-4,009	0,863-1,814	0,129-0,301

Расположение продукта внутри сушильной камеры, а также различные варианты подачи и протекания сушильного агента в ней определяются конструкцией установки. Как уже отмечалось ранее в сушильной камере могут возникать процессы неравномерной сушки продукта, причиной которой могут быть также и конструктивные особенности установки.

Как видно в процессе сушки существует много факторов, которые стоит учитывать при разработке сушильных установок. По нашему мнению, разработать сушильную установку, которая бы имела параметры и режимы сохраняющие полезные свойства пчелиной перги, отличалась бы простотой

конструкции, низкой стоимостью и энергозатратами невозможно без проведения математического моделирования теплофизических процессов, происходящих в ней.

1.2 Существующее оборудование для сушки сельскохозяйственных продуктов и его особенности

Для сушки сельскохозяйственного сырья, которое представляет из себя, как правило, сыпучий материал, на данный момент существует множество способов и устройств. Все они имеют как достоинства, так и недостатки в зависимости от их использования в тех или иных отраслях АПК.

По способу подвода теплоты к высушиваемому продукту среди сушильных камер, используемых в сельском хозяйстве для сушки растительного сырья, выделяют: контактные, конвективные, сублимационные, радиационные, высокочастотные сушилки.

Контактные сушильные установки предполагают нагрев продукта теплоносителем через стенку. К ним можно отнести вакуумные-сушилки подвод теплоты к продукту в которых осуществляется через греющие плиты, нагреваемые паром. К недостаткам таких установок относят: низкую производительность, большие энергозатраты, сложность и дорогое оборудование. Также среди контактных сушильных установок выделяют вальцовые, но они используются в основном для сушки тонких материалов, а также паст и суспензий и для сушки перги не подходят. Главным недостатком контактных сушилок, при котором их нельзя рекомендовать для сушки пчелиной перги заключается в образовании корки на поверхности продукта.

Конвективные сушильные установки. Самый распространенный способ сушки сельскохозяйственной продукции, заключающийся в пропускании

через продукт нагретого потока сушильного агента. Свое распространение получил за счёт простоты реализации и низкой стоимости установок по сравнению с другими методами. По сути, данный способ сушки включает в себя электрокалорифер или любой другой источник теплоты, который нагревает циркулирующий внутри камеры с продуктом воздух или другой подходящий газ. Продукт внутри сушильной камеры может быть как в неподвижном состоянии, так и перемещаться с помощью ленточных транспортёров (ленточные сушилки), вращающегося барабана, наклонённого под небольшим углом к горизонту (барабанные сушилки), а также за счёт действия силы тяжести (шахтные сушилки). Перемещение перги на наш взгляд является нежелательным процессом ввиду увеличения в ней при этом мелкой фракции. К недостаткам конвективных сушильных установок можно отнести: неравномерность сушки, значительные энергозатраты на нагрев сушильного агента. Основным достоинством данного вида сушки является возможность создания условий, сохраняющих полезные свойства продукта, правда при этом возможно снижение производительности установки за счёт увеличения времени сушки.

Сублимационная сушка. Представляет из себя сушку в глубоком вакууме, при давлении 13,3-133,3 Па при отрицательных температурах (рис. 1.2).

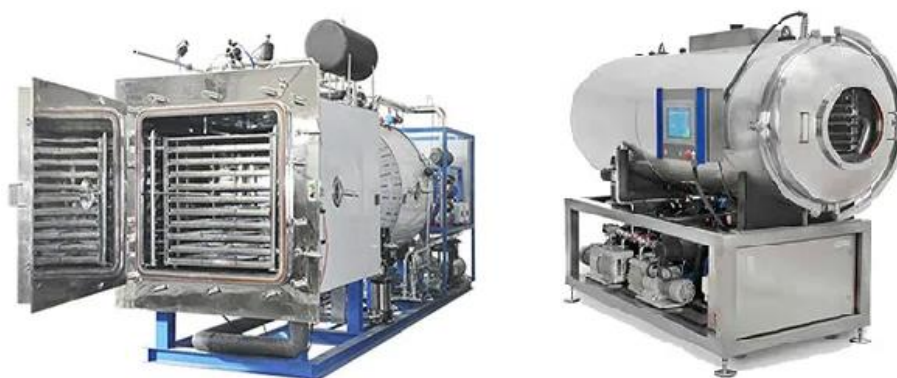


Рисунок 1.2 – Изображения установок для сублимационной сушки

По мнению [83] основным достоинством данного способа при сушке растительного сырья является, то, что с его помощью можно сохранить

витамины и другие полезные вещества, содержащиеся в продукте. Хотя из других литературных источников известно, что пчелиная перга при заморозке теряет свои полезные свойства [52]. Как бы там ни было, существенным недостатком сублимационной сушки является необходимость использования дорогостоящего оборудования.

Радиационная сушка. Предполагает испарение влаги с помощью подвода тепла излучением. Источником такого излучения могут стать инфракрасные лампы или плёночные нагреватели. Основным достоинством данного типа сушки является ускорение процесса удаления влаги из продукта. При сушке продуктов с помощью рассматриваемого способа интересна зависимость их спектральных характеристик от оптических характеристик ИК-нагревателей. Такие исследования проведены В.М. Поповым, В.А. Афонькиной, В.Н. Левинским [74, 75]. Ими исследованы ИК-сушка томатов, семян рапса, различных зелёных культур и разработаны различные конструкции ИК-сушилок (рис. 1.3).



а)

б)

в)

а, б) инфракрасная сушильная установка транспортёрно-каскадного типа,

б) цилиндрическая ИК-сушилка томатов

Рисунок 1.3 – Фотографии сушильных ИК-установок разработанных В.М.

Поповым, В.А. Афонькиной, В.Н. Левинским

Знание пропускной и поглощательной способности во всем диапазоне длин волн инфракрасного излучения, позволяет грамотно выбрать генератор ИК-излучения. По стоимости оборудования ИК-сушилки в 3-4 раза дороже

конвективных. Высокая стоимость ИК-сушилок окупается со временем низким энергопотреблением.

Высокочастотная сушка. Данный способ сушки заключается в погружении высушиваемого продукта в электрическое поле, создаваемое токами высокой частоты. Несмотря на высокую скорость сушки, недостатком такого способа являются высокие энергозатраты и стоимость оборудования.

Таким образом, к основным недостаткам сушильных установок можно отнести: большое время сушки, высокую стоимость оборудования, низкое качество получаемого продукта, высокие энергозатраты, неравномерность сушки. Среди всех упомянутых способов наиболее приемлемым для сушки пчелиной перги с позиции низкой стоимости оборудования и сохранности полезных свойств продукта является конвективный способ. Но в нём существует ряд проблем, связанных с низкой скоростью сушки, её неравномерностью и высокими энергозатратами. Они должны иметь научно обоснованное решение.

1.3 Современные оборудование и исследования в области сушки пчелиной перги

Устранению описанных выше недостатков сушильных установок посвящено множество исследований, отражённых как в отечественной литературе, так и за рубежом. Так у нас в стране в настоящее время большой вклад в исследование и совершенствование процесса сушки сельскохозяйственной продукции внесли В.М. Попов и В.А. Афонькина (ФГБОУ ВО Южно-Уральский ГАУ), Б.А. Вороненко (ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО»), Н.И. Малин (РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева), А.А. Завалий (Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского) и многие другие [2, 73, 13, 12, 49, 50, 24, 25].

Большой вклад в развитие сушилок именно для пчелиной перги внесли такие учёные как Д.Е. Каширин и С.В. Винокуров, Р.А. Мамонов (ФГБОУ ВО РГАТУ имени П.А. Костычева) [10, 32, 33, 34, 35, 30, 52, 56, 57, 11, 36]. Деятельность же иностранных авторов в этой тематике направлена в большей степени на исследование полезных свойств перги, её состава и безопасности, сохранении качества продукта в процессе сушки, нежели на совершенствовании установок для её осуществления [100, 103, 104].

Среди основных способов, применяемых для сушки пчелиной перги, можно выделить: конвективный, вакуумный, инфракрасный.

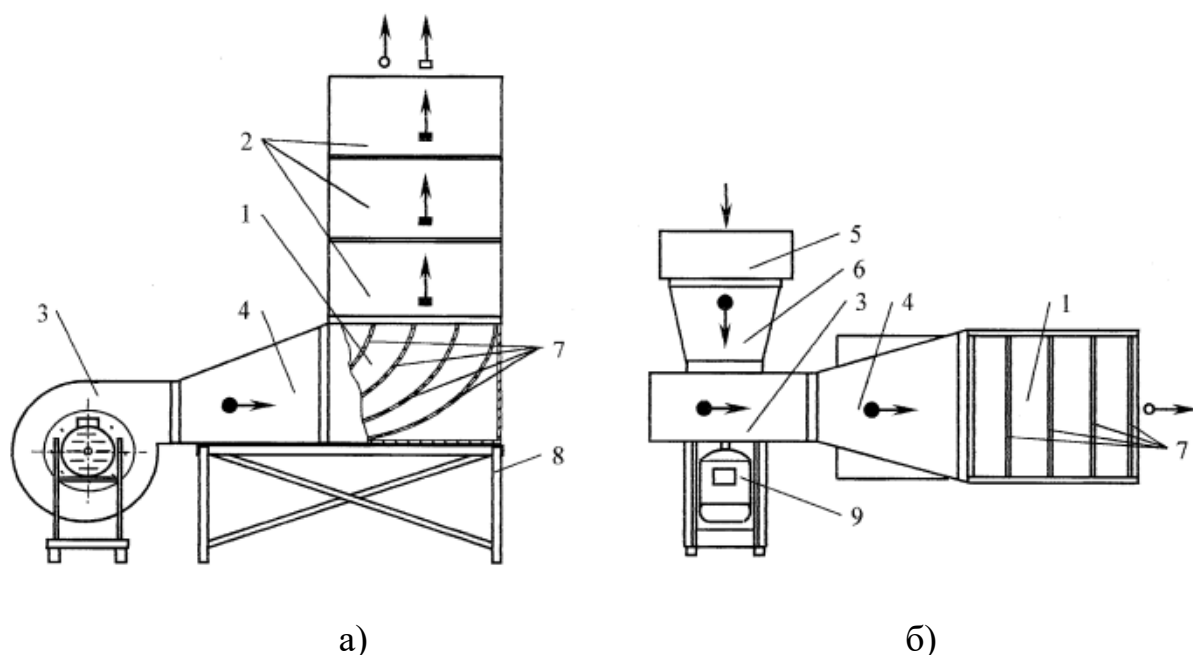
Конвективный способ. Как уже говорилось ранее это наиболее распространённый способ сушки сельскохозяйственных продуктов. Существует множество конструкций конвективных сушилок, различающихся расположением продукта внутри сушильной камеры, созданием осциллирующих режимов работы. Зачастую в качестве сушильного агента используется воздух, но вместе с ним могут использоваться и другие газы. Так, например в одном из патентов Д.Е. Каширина для санации перги в установке используется озонатор [65]. Также известны исследования сушки пчелиной пыльцы теплым озонированным воздухом [16]. Несмотря на то, что озон является отличным окислителем и бесспорно одним из лучших дезинфектантов, он имеет и существенные недостатки в виде токсического воздействия на организм человека в случае его утечки (озон имеет низкий уровень ПДК, всего $0,1 \text{ мг/м}^3$), а также отрицательного воздействия на многие металлы (в виде окисления) и элементы установки, состоящие из резиновых материалов (в виде растрескивания), которые например, используются для герметизации дверей сушильной камеры. К тому же из исследований описанных в [87] определено, что воздействие озона на пергу приводит к существенному снижению содержания в ней флавоноидных соединений, которые являются мощными антиоксидантами, благотворно влияющими на здоровье. Таким образом, рекомендовать использовать озон в сушильных установках для перги невозможно.

Наиболее простой конструкцией конвективных сушилок обладают сушилки польской фирмы Lyson. Хотя они заявлены, как сушилки для пчелиной пыльцы в них можно сушить и пчелиную пергу. В данных установках нагретый воздух продувается через лотки с продуктом и удаляется наружу (рис. 1.4). К существенным недостаткам такого типа сушилок следует отнести: необоснованно высокую цену ввиду примитивности конструкции, наличие возможности регулирования температуры в широком диапазоне от 40 до 90 °С, что может сказаться на качестве продукции, однократное использование агента сушки.



Рисунок 1.4 – Изображение конвективной сушилки фирмы Lyson

Процесс конвективной сушки перги в сотах подробно рассмотрен в работе С.В. Винокурова. В установке, исследуемой автором, перга в сотах располагалась вертикально (рис. 1.5). Установлено, что наиболее оптимальным является осциллирующий режим работы (под которым понимается чередование процессов нагрева и охлаждения перги), причём температура сушильного агента в этом случае может быть больше 40 °С, но не более 60 °С (максимум температуры ограничен температурой плавления воска равной 64 °С), что интенсифицирует процесс.

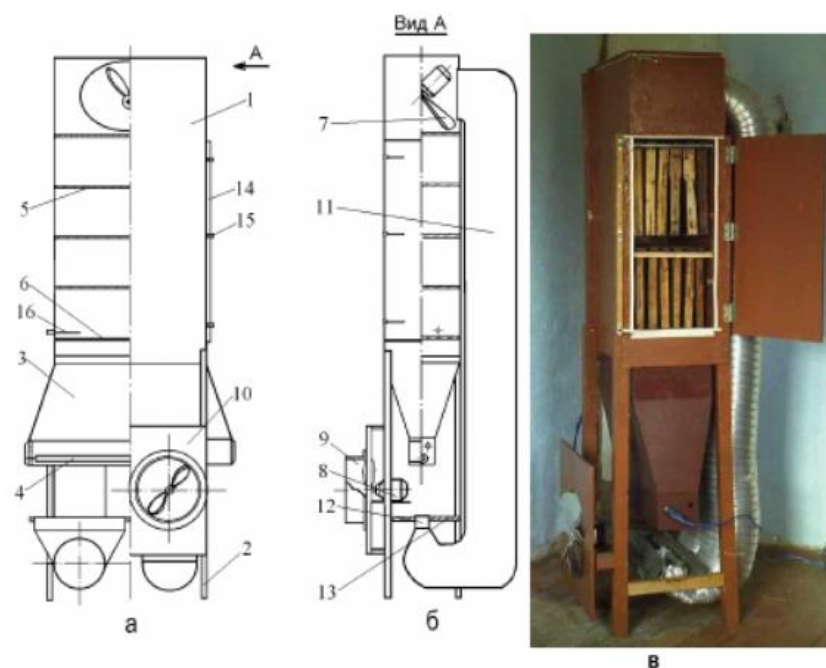


а – вид спереди, б – вид сверху: 1 – сушильная камера, 2 – корпус ульев, 3 – вентилятор, 4 – воздуховод, 5 – электрокалорифер, 6 – патрубок, 7 – направляющие, 8 – опорный стол, 9 – электродвигатель

Рисунок 1.5 – Схема установки разработанной С.В. Винокуровым [11]

По нашему мнению, такой температурный режим пригоден для сушки перги в сотах, но совсем не пригоден для сушки перги в виде засыпки из гранул, так как его температура, как уже говорилось ранее, в этом случае не должна превышать 40 °С. Но даже с учётом использования сушильного агента с необходимой температурой применение используемого С.В. Винокуровым осциллирующего режима для сушки гранул пчелиной перги привело бы к увеличению времени работы и соответственно к снижению производительности установки.

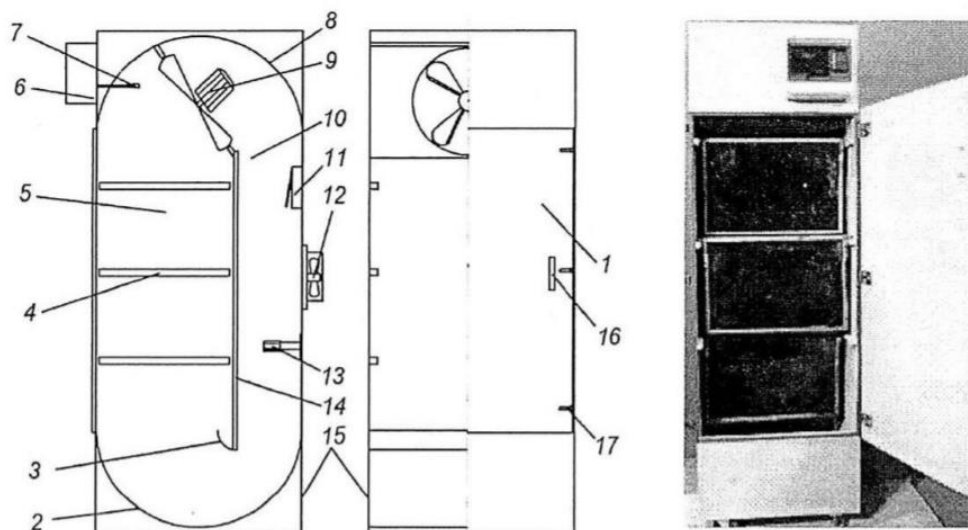
Дальнейшее совершенствование конвективных сушилок для пчелиной перги было осуществлено в исследованиях проводимых Д.Е. Кашириным. Им разработаны установки представленные на рис. 1.6 и 1.7. Их конструкция позволяет проводить сушку перги не только в сотах, но и россыпью в гранулах.



- 1 – сушильная камера, 2 – опоры, 3 – электрокалорифер, 4 – ТЭНы, 5 – полки для сот, 6 – защитная сетка, 7, 8 – электровентили, 9 – направляющие, 10 – щит, 11 – воздуховоды, 12 – конфузор, 13 – держатель конфузора, 14 – дверца, 15 – замки, 16 – термодатчик

Рисунок 1.6 – Схема и фотография установки для конвективной сушки перги в сотах разработанная Д.Е. Кашириным [64]

Данные сушилки работают по одинаковому принципу. Он заключается в создании осциллирующего режима работы, который представляет из себя замкнутую циркуляцию сушильного агента через продукт посредством обратного воздухопровода до тех пор, пока его влажность не превысит заданную величину, после чего он заменяется свежей порцией воздуха извне и цикл повторяется [36]. В момент замены сушильного агента его нагрев не осуществляется. По нашему мнению, такой режим увеличивает время сушки и соответственно снижает производительность установки. Согласно приведённым автором данным сушка может занимать до 50 часов. За это время влажность снижается с 21,6% до 15,5% в случае сушки перги в сотах и с 18,3% до 11,0% при сушке перги в гранулах.



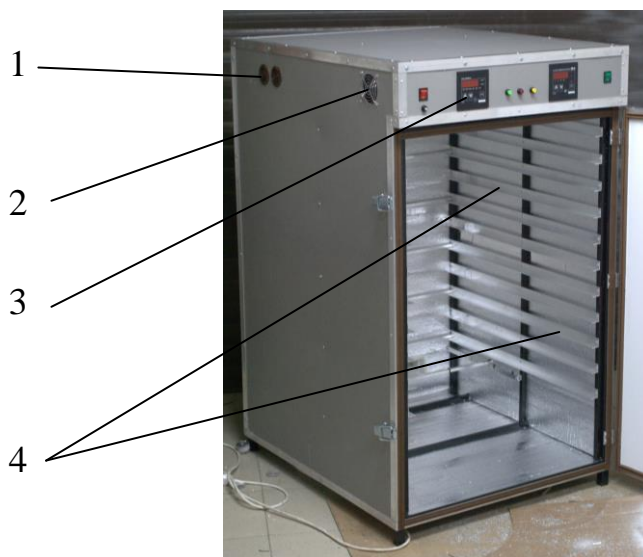
1 – дверь, 2, 3, 8 – направляющие воздушного потока, 4 – направляющие планки,
 5 – сушильная камера, 6 – блок управления, 7 – термодатчик, 9, 12 – вентиляторы,
 10 – обратный воздухопровод, 11 – пневмоклапан, 13 – ТЭН, 14 – перегородка,
 15 – корпус, 16 – ручка, 17 – замки

Рисунок 1.7 – Схема и фотография усовершенствованной конструкции
 конвективной сушильной установки Д.Е. Каширина [65]

Несомненным достоинством установки является создание «мягких» условий для сушки перги в результате которых сохраняются её полезные свойства. Согласно представленной схеме на рис. 1.7, при сушке гранул перги, продукт укладывается в лотки с сетчатым дном, которые располагаются внутри сушильной камеры с помощью направляющих планок. По нашему мнению, в процессе сушки влага из нижних лотков будет устремляться вверх (т.к. нагретый воздух, выступающий в роли сушильного агента, циркулирует через лотки снизу вверх), что будет переувлажнять лотки, находящиеся выше. На этот процесс будут влиять следующие факторы: начальная влажность перги и сушильного агента, толщина слоя гранул пчелиной перги, его пористость и проницаемость, скорость потока воздуха через него и сопротивление сетки лотка, оказываемое этому потоку (по всей видимости оно будет настолько мало, что им можно пренебречь при дальнейшем рассмотрении). В свою очередь лотки, находящиеся снизу, будут увлажняться воздухом, поступающим от верхних лотков через

обратный воздухопровод, что с одной стороны, несколько снизит градиент влажности сушильного агента между лотками, но с другой стороны никак не будет способствовать их сушке, а наоборот добавлять им ранее удалённую из них влагу. Остановка процесса нагрева сушильного агента и заполнение сушильной камеры новой порцией наружного воздуха в результате работы установки в осциллирующем режиме с одной стороны приведёт к удалению скопившейся влаги из сушильной камеры, с другой стороны внесёт в неё влажный воздух, который необходимо вновь осушить в процессе работы ТЭНа. Стоит также отметить, что лотки, на которых размещается продукт в данных конвективных установках имеют вибровозбудитель для интенсификации процесса сушки путём перемещения материала. Но в [52] это отмечается, как недостаток ввиду разделения гранул перги при работе вибровозбудителей на меньшие фракции, что в свою очередь способствует забиванию сетчатого дна лотков и соответственно служа препятствием прохождению сушильного агента.

В Краснодарском крае пчеловодами используются похожие конвективные установки (рис. 1.8).

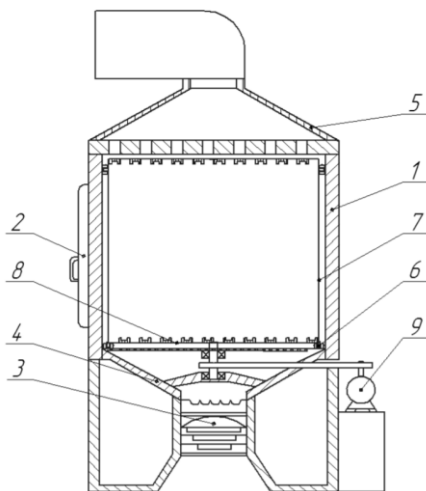


1 – отверстия для отвода отработанного агента сушки, 2 – вентилятор охлаждения системы управления сушилкой, 3 – автоматический регулятор, 4 – опоры для лотков

Рисунок 1.8 – Внешний вид установки для конвективной сушки пчелиной перги

Установка состоит из корпуса, в котором находятся лотки, представляющие из себя квадратную стальную раму с сеткой, на которой лежит перга. Лотки расположены друг над другом. Внизу камеры располагается электрокалорифер. Внутренние стенки камеры покрыты теплоизоляционным материалом. В отличие от предыдущей установки в этой отсутствует система рекуперации, пройденный один раз через сушильную камеру теплоноситель выбрасывается наружу через верхние боковые отверстия. За счёт расположения лотков друг под другом в данной установке проявляются проблемы пересушивания нижних лотков, которые расположены ближе к электрокалориферу, по отношению к верхним.

Известна конвективная установка для сушки перги в сотах, заключающаяся в том, что продукт укладывают в барабан, который затем приводят во вращение с одновременным протеканием через сделанные в нём перфорированные отверстия сушильного агента [23]. По мнению авторов такая конструкция позволяет в 3,5 раза сократить удельные затраты энергии на обработку 1 кг перговых сотов, металлоемкость в 1,5 раза и стоимость в 2,6 раза (рис. 1.9).

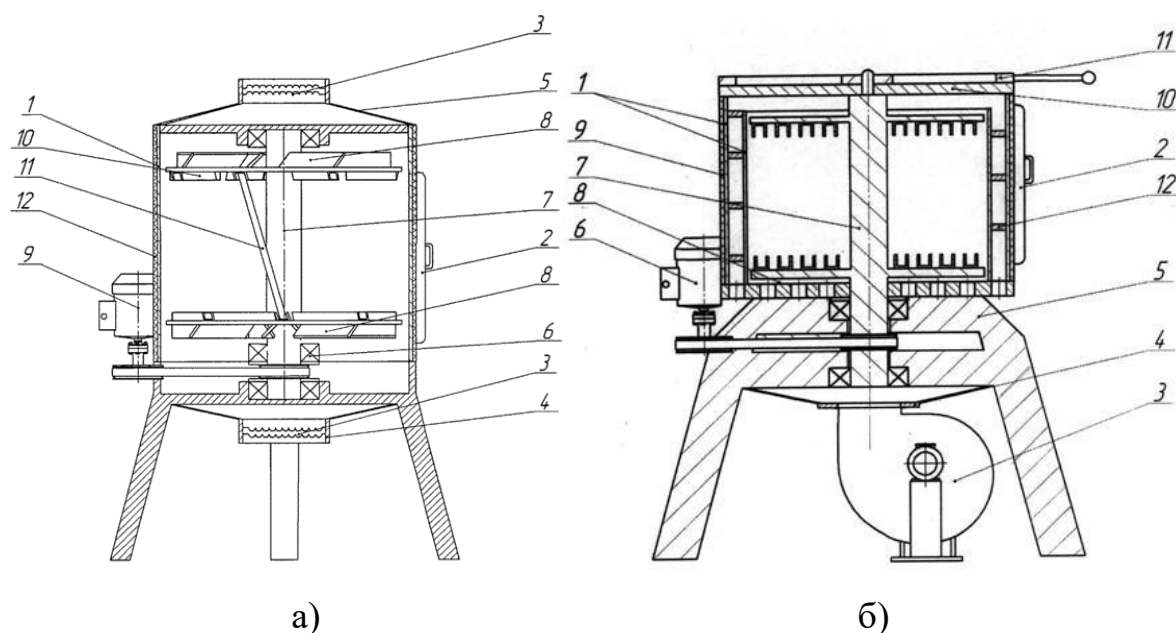


1 – кожух, 2 – загрузочная дверь, 3 – электрокалорифер, 4, 5 – воздуховод, 6 – опора, 7 – барабан, 8 – полки для сотов, 9 – реверсивный привод

Рисунок 1.9 – Схема установки для конвективной сушки пчелиной перги с вращающимся барабаном [23]

К сожалению, в приведённой статье авторами не обосновывается за счёт чего достигается такой эффект. По нашему мнению, добавление дополнительного двигателя для вращения никак не способствует снижению энергозатрат и металлоёмкости установки, не говоря о её стоимости.

Принцип вращения сотов с пергой во время их сушки этими же авторами продолжен в серии патентов [68, 66, 67]. В данных изобретениях интересна идея использования сот с пергой в качестве лопастей вентилятора, которые установлены в барабане под углом к оси его вращения (рис. 1.10 а). Это в отличие от установки приведённой на рис. 1.9, может способствовать снижению металлоёмкости, но, с другой стороны, авторами не сказано о том, какую скорость должен развивать барабан с продуктом чтобы добиться нужного эффекта и не повредить сами соты. Стоит также отметить о вторичном использовании в [66] потока уже отработанного сушильного агента. При его отводе из установки он соприкасается с наружной частью вращающегося барабана отдавая ему дополнительную теплоту или наоборот препятствуя её отводу от него (рис. 1.10 б).

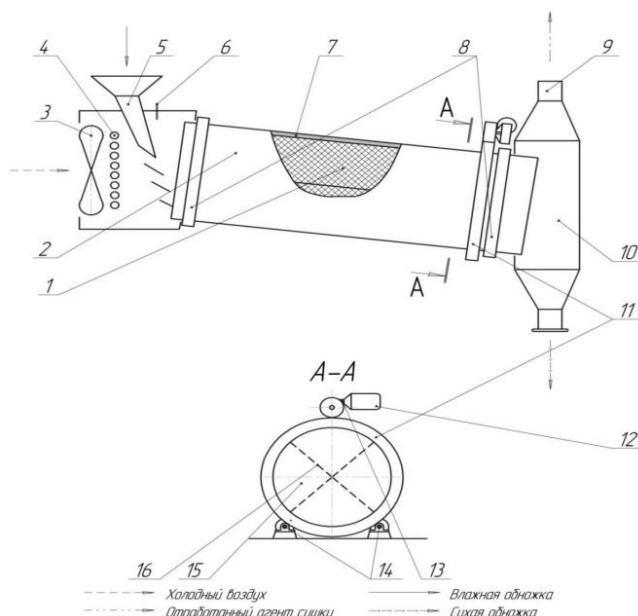


а) 11 – соты с пергой б) 12 – спиралевидный канал для создания потока сушильного агента
Рисунок 1.10 – Схемы установок из патентов РФ №2549380 (а) и №2498178

(б)

По нашему мнению, такой принцип возможен не только при выводе сушильного агента из установки, но и при его подводе к ней. Например, влажный наружный воздух, подводимый к установке до электрокалорифера, можно слегка осушить, если провести его вдоль наружных стенок сушильной камеры, уже нагретых воздухом внутри неё.

Принцип вращения продукта при его сушке, заложенный в конструкции представленных установок, не подходит для сушки пчелиной перги в гранулах, которые разлетятся в барабане под действием центробежной силы. Для этой цели Р.А. Мамоновым разработана барабанная сушильная установка отличающаяся от описанных ранее [52]. Она представлена на рис. 1.11.



1 – сетчатая вставка, 2 – корпус, 3 -вентиляторы, 4 – калорифер, 5 -загрузочное устройство, 6 – датчик температуры, 7 – теплоизолирующий материал, 8 – направляющие бандажи, 9 – патрубок вывода отработанного теплоносителя, 10 – разгрузочный бункер, 11 – цилиндрическая зубчатая передача, 12 – электродвигатель, 13 – червячный редуктор, 14 – опорные ролики, 15 – сектор, 16 – сетчатая перегородка

Рисунок 1.11 – Схема барабанной сушильной установки [52]

Барабан установки разделён на 4 секции, в которые перга попадает поочерёдно. В то время как перга вращается в барабане она одновременно

обдувается потоком сушильного агента. Во время вращения перга интенсивно перемешивается, что способствует ускорению сушки. К недостаткам данной установки стоит отнести сложность конструкции и возможность разделения перги на фракции, хоть и с меньшей вероятностью, чем при работе вибровозбудителей в описываемой ранее конвективной установке, так как скорость вращения барабана не высокая.

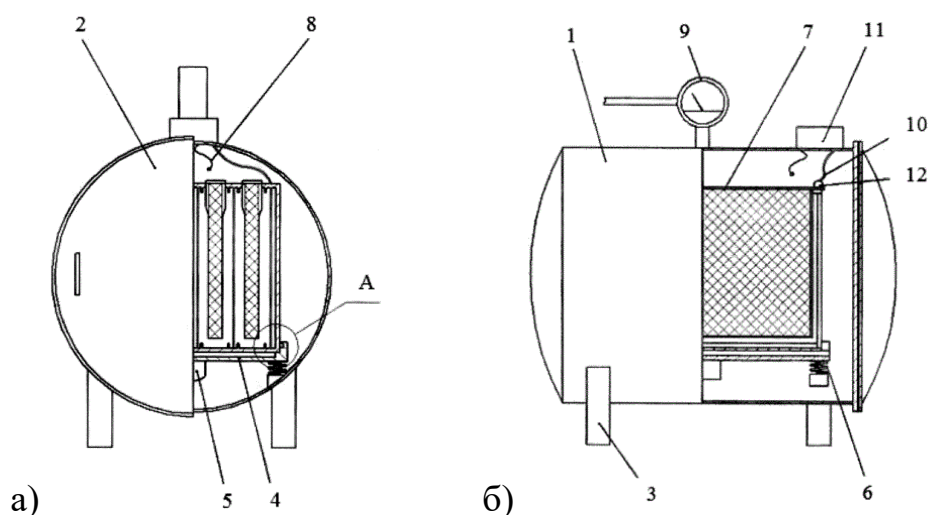
Несомненно, конвективный способ сушки один из самых простых и дешёвых и как видно ещё требующий дальнейших исследований в части интенсификации процессов сушки перги в виде гранул.

Вакуумный способ сушки. Заключается в размещении продукта в герметичной камере, в которой создаётся разряжение и производится нагрев продукта. Создание вакуума в камере приводит к уменьшению значения температуры, при котором происходит испарение влаги. Такое решение значительно интенсифицирует процесс сушки. Так Д.Е. Кашириным определено, что данный способ гораздо быстрее снижает влажность пчелиной перги по сравнению с конвективной сушкой. Отмечается, что при сушке перги в соте под вакуумом величиной 0,098...0,099 МПа на теплоподводящей поверхности, разогретой до $+50\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, влажность продукта снижается от 25,2 % до 7,7 % в течение 14 часов. При сушке предварительно извлеченных из сота гранул перги под вакуумом с теми же параметрами давления и температуры, влажность перги снижается от 25,2 % до 6,5 % в течение 14 часов [36]. Несмотря на положительный эффект в виде высокой скорости сушки продукта данный способ имеет недостатки. Во-первых, для его осуществления требуется дорогостоящее оборудование, а во-вторых, не все исследователи однозначно приходят к мнению о сохранности полезных свойств продуктов при использовании этого способа сушки. Так, например, в статье Д.Е. Каширина и М.Н. Харитоновой говорится о том, что при вакуумной сушке в перге сохраняется меньше полезных веществ, чем при конвективной [31]. С другой стороны, вакуумная сушка пыльцы, которая является «строительным материалом» при приготовлении пчелами перги

согласно [1] не оказывает отрицательного влияния, а напротив сохраняет её белково-витаминный комплекс.

Ещё одним недостатком вакуумных сушилок ряд авторов [11, 52] считает их крайне малую производительность. Таким образом, на сегодняшний день рекомендовать данный способ сушки пчелиной перги не предвидится возможным.

Инфракрасный способ сушки. Как и конвективный способ является довольно распространённым в пчеловодстве. Опять-таки за свою простоту и низкую стоимость. Инфракрасные плёночные нагреватели используется многими пчеловодами для зимнего подогрева ульев, разогрева мёда, сушки пчелиной пыльцы [41]. Поэтому его использование отдельно или совместно с другими способами сушки пчелиной перги весьма актуально. Так, например, в [9] отмечается ускорение процесса сушки при использовании ИК-нагревателей совместно с вакуумным способом. Также известен патент на установку для сушки перги в сотах и в гранулах в котором авторы совмещают вакуумную сушку и ИК-сушку [70]. В установке ИК-нагреватели устанавливаются между сотов или сетчатых лотков с гранулами перги (рис. 1.12).



а) вид спереди, б) вид сбоку

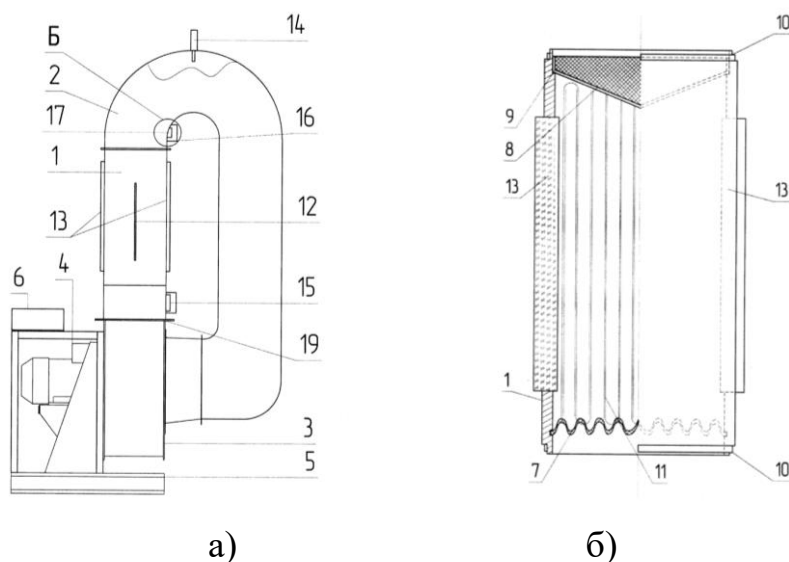
1 – вакуумная цилиндрическая камера, 2 – герметичная дверь, 3 – опоры, 4 – универсальный каркас для установки кассеты, 5 – вибровозбудитель, 6 – пружины, 7 – кассета для расположения сот или лотков с пергой, 8 – датчик температуры, 9 – вакуумметр, 10 – кабель питания ИК-нагревателей, 11 – блок управления, 12 – штекер

Рисунок 1.12 – Схема установки для сушки [70]

По нашему мнению, такое расположение продукта и ИК-нагревателей является наиболее оптимальным с точки зрения подвода тепла.

Вследствие отрицательного воздействия вакуумной сушки на пчелиную пергу нам видится целесообразным комбинация ИК-сушки с конвективной. Правда в этом случае расположение ИК-нагревателей в сушилке будет затруднено ввиду необходимости расположения опор-направляющих, как минимум по бокам сушильной камеры, для лотков с продуктом, как это сделано в конструкциях представленных на рис. 1.6 – 1.8. Поэтому расположить ИК-нагреватели в таком случае можно будет только на задней стенке или дверце сушильной камеры.

Использование только ИК-нагревателей для сушки пчелиной перги реализовано в патенте [72]. В представленной установке используется тот же осциллирующий режим, что и в установках представленных на рис. 1.6 и 1.7. Но при этом продукт в цилиндрической сушильной камере, по периметру которой расположены ИК-нагреватели, витает в воздушном потоке, создаваемом мощным вентилятором (рис. 1.13).



а) вид сбоку, б) схема сушильной камеры

1 – сушильная камера, 2 – воздуховод, 3 – вентилятор, 4 – привод вентилятора, 5 – рама, 6 – блок управления, 7 – сетчатое дно, 8 – сетчатый фильтр, 9 – загрузочное отверстие, 10 – уплотнители, 11 – ИК-излучатель, 12 – рукоять, 13 – смотровое окно, 14 – датчики влажности и температуры, 15 – электропневматический клапан, 16 – обратный клапан, 17 – датчик положения

Рисунок 1.13 – Схема сушильной установки из патента РФ №2758017

К недостаткам данной установки следует отнести малую загрузку сушильной камеры пергой и соответственно небольшую производительность, а также вероятность разделения на фракции гранул перги при их соударении друг с другом или с корпусом сушильной камеры во время витания в процессе сушки.

Также существует патент на установку для сушки перги инфракрасным способом [69]. По факту данная установка представляет из себя сушилку показанную на рис. 1.7 за исключением того, что вместо ТЭНа нагрев продукта осуществляется с помощью ИК-ламп, размещённых над каждым лотком с пергой. Поэтому данная установка имеет те же недостатки.

Определение оптических характеристик перговых сотов осуществлено Д.Н. Бышовым, Д.Е. Кашириным и С.С. Морозовым [8]. Ими сделан вывод о том, что перговые соты являются хорошим поглотителем ИК-энергии. Степень черноты составляет 0,885-0,886.

Согласно проведённому обзору, не все известные установки подходят для сушки пчелиной перги. В первую очередь это касается вакуумных установок, которые, как видно не гарантируют сохранность полезных свойств пчелиной перги. С этой точки зрения наиболее подходящим является конвективный способ сушки, причём без движения продукта внутри сушильной камеры дабы не получать мелкую фракцию перги. Но ключевые проблемы работы конвективных установок, а именно неравномерность сушки, её длительность и высокие энергозатраты до сих пор не решены или решены частично и зачастую за счёт снижения других параметров и показателей. По все видимости решение данной проблемы невозможно бесконечным перебором удачных идей и изготовлением множества, экспериментальных образцов ввиду экономической нецелесообразности этого. Наиболее удачным способом совершенствования конвективных установок, по нашему мнению, является моделирование процессов, протекающих в них. Первичный анализ тех или иных идей совершенствования конвективных установок в виде, например, изменения

конструкций установок, их режимов работы гораздо выгоднее с экономической точки зрения вести путём использования современных вычислительных средств и программных комплексов позволяющих моделировать различные физические процессы. После чего можно осуществлять реализацию установки в реальности. Рассмотрим современное состояние вопроса касательно описания процессов, протекающих при сушке пчелиной перги.

1.4 Проблемы теоретического описания и моделирования процессов в конвективных установках для сушки перги

Кинетикой сушки называется изменение во времени средней влажности материала, и она зависит от свойств конкретного продукта. Характерный вид кинетики сушки представлен на рисунке 1.14. Как правило, выделяют два специфичных участка кривой сушки: период постоянной скорости сушки (участок АВ) и период переменной или падающей скорости сушки (участок ВС).

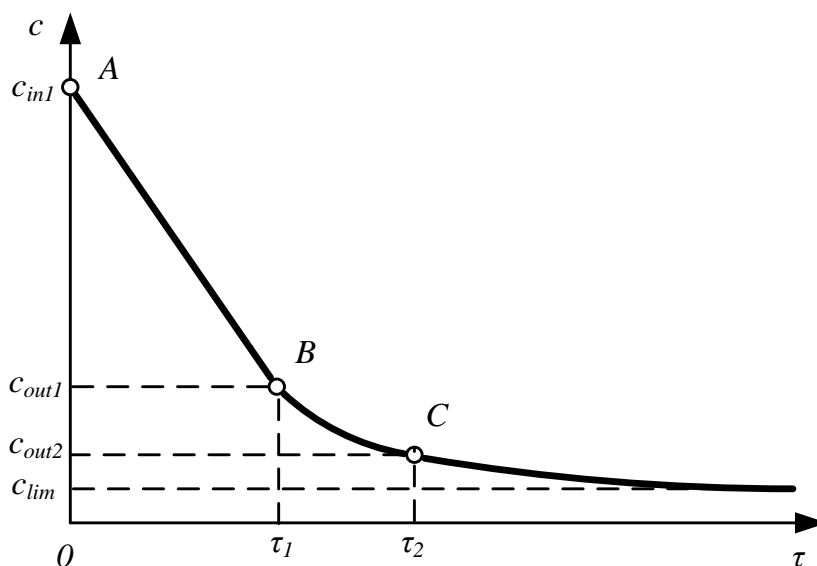


Рисунок 1.14 – Кинетика сушки исходного материала

Первый участок характерен тем, что идет процесс поверхностного испарения. При этом поверхность материала покрыта влагой и идет возмещение испаряющейся влаги вследствие диффузии ее из внутренних слоев. Скорость диффузии влаги равна скорости испарения воды с поверхности продукта. Скорость процесса ограничивается скоростью поверхностного испарения.

Количество испаренной жидкости в первом периоде сушки можно определить по формулам [28]:

$$W = F\beta_x(x_1 - x)\tau_1, \quad W = F\beta_p(p_1 - p)\tau_1, \quad (1.1)$$

где F – площадь поверхности фазового контакта, x_1, x – влагосодержание насыщенного воздуха в условиях сушки и действительная влажность воздуха соответственно; p_1, p – парциальное давление насыщенного воздуха и действительное парциальное давление воздуха соответственно; β_x, β_p – коэффициенты массоотдачи; τ_1 – продолжительность первого периода сушки.

Второй период сушки характеризуется тем, что подвод влаги к поверхности замедляется. Уравнение его описывающее может быть представлено следующим образом [28]:

$$W = KF(c - c_{равн})\tau_2, \quad (1.2)$$

где K – коэффициент скорости сушки; c – влажность материала в данный момент; $c_{равн}$ – равновесная влажность материала; τ_2 – продолжительность второго периода сушки.

Как видно из формул (1.1) величину W достаточно трудно найти ввиду необходимости определения коэффициентов массоотдачи. В каждом конкретном случае их определяют, обобщая опытные данные (часто используя методы теории подобия). К тому же параметр F в формулах (1.1) и (1.2) в случае рассмотрения засыпки из гранул пчелиной перги будет напрямую зависеть от пористости её слоя. Тут также стоит отметить и такой важный параметр, как проницаемость данного слоя. Эти два параметра присущи любым пористым телам. Их знание важно при рассмотрении процессов протекания сушильного агента внутри сушильной камеры.

Пористость и проницаемость при сушке пчелиной перги можно рассматривать в двух вариантах: 1) как параметры, характеризующие протекание сушильного агента непосредственно сквозь саму гранулу перги; 2) сквозь засыпку из перговых гранул находящуюся в лотке сушильной камеры. От пористости во многом зависит эффективность гидромеханических, тепловых, массообменных и химических процессов. Как правило, методы определения пористости не просты, требуют сложного и дорогостоящего оборудования. Пористость один из важнейших параметров сыпучего материала обуславливающий его реакцию на воздействие факторов окружающей среды: влаги, газов, температуры и т.д. Поэтому при моделировании физических процессов, в которых сыпучий материал подвергается внешнему воздействию потоков различных газов или жидкостей важно знать его пористость.

По найденным С.В. Винокуровым объёмной массе и плотности (табл. 1.1 и 1.2) можно определить пористость пчелиной перги ε по формуле:

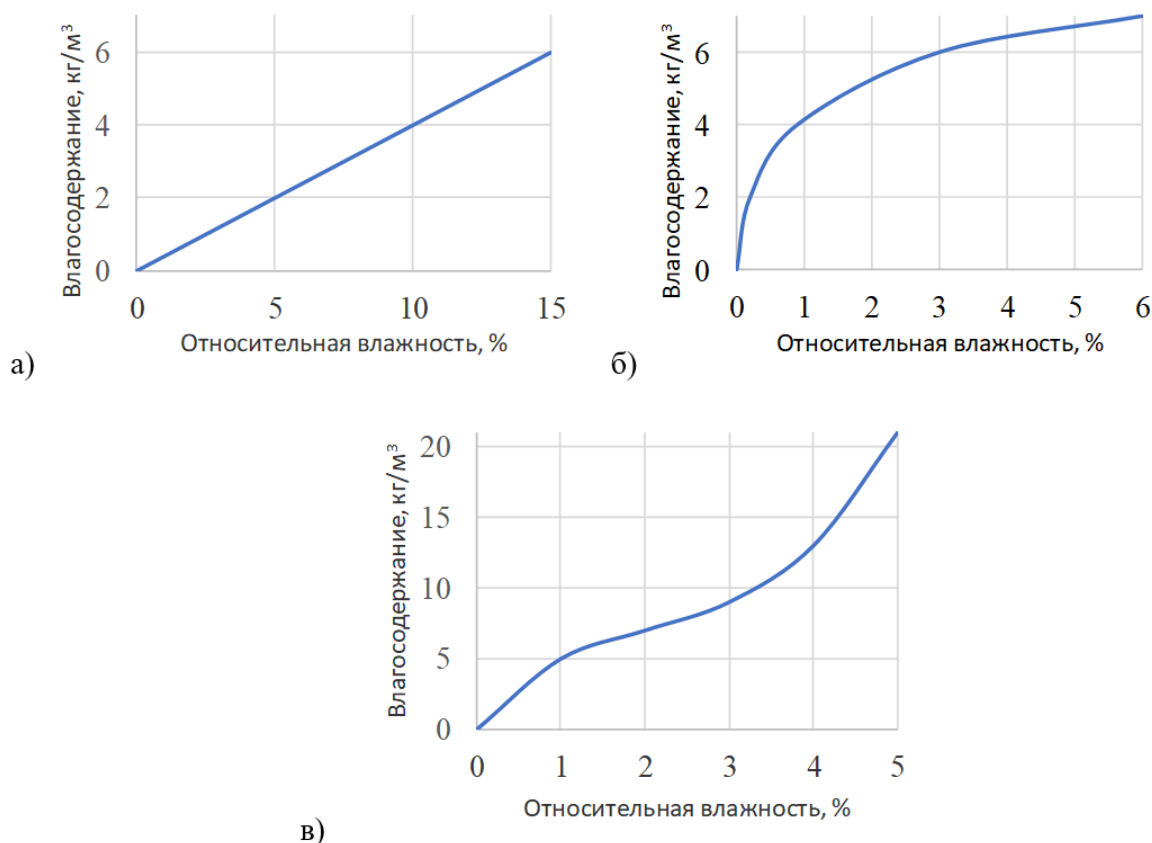
$$\varepsilon = \left(1 - \frac{\rho}{\rho_0}\right) \cdot 100\%, \quad (1.3)$$

где ρ - объёмная масса, кг/м³; ρ_0 - плотность, кг/м³.

Подставив средние значения из приведённых выше табличных данных пористость пчелиной перги $\varepsilon = 0,5$. По нашему мнению, пористость и проницаемость самой перги не оказывают существенного влияния на процесс сушки. Но в случае засыпки из перговых гранул этими параметрами пренебречь уже нельзя ввиду их существенного влияния на перенос тепла и влаги (так как размеры пор, образуемых гранулами в засыпке при этом сопоставимы с размерами самих гранул). На сегодняшний день значения пористости и проницаемости засыпки из гранул пчелиной перги в литературе неизвестны, что требует проведения дополнительных исследований. Также стоит отметить, что в отличие от пористости, которая практически будет постоянной, значение проницаемости засыпки из перговых гранул будет зависеть от нескольких факторов: от геометрических размеров сушильной

камеры, толщины слоя продукта и скорости потока сушильного агента через него. По нашему мнению, значения пористости и проницаемости продукта обязательно надо учитывать при моделировании процессов его сушки. Так как это позволит увидеть процессы переноса тепла и влаги внутри слоя, сформированного гранулами перги.

Помимо отсутствия информации о пористости и проницаемости пчелиной перги, также и нет в литературе информации о изотерме сорбции влаги пчелиной пергой, которая играет существенную роль при рассмотрении процессов сушки. Она представляет собой зависимость равновесного влагосодержания в перге от относительной влажности воздуха её окружающего при постоянной температуре. Равновесное влагосодержание определяет способность продукта удерживать влагу. Существует несколько типов изотерм сорбции (рис. 1.15).



а) линейная изотерма или изотерма Генри, б) изотерма Фрейндлиха, в) изотерма Брунауэра-Эмметта-Теллера (БЭТ)

Рисунок 1.15 – Вид изотерм сорбции влаги

В литературе известны эмпирические зависимости для определения равновесного влагосодержания картофеля, моркови, лука, свеклы, зелёного горошка, различных круп. Знание этой зависимости для пчелиной перги позволит смоделировать процесс её сушки. Существует множество способов определения изотермы сорбции влаги продуктом. На наш взгляд наиболее простой и доступный заключается в выдерживании образцов продукта при определённых значениях влажности воздуха и температуры. Такое можно сделать с помощью эксикаторов в лабораторных условиях. А для создания влажности внутри эксикаторов можно использовать водные растворы серной кислоты.

Многие из представленных в п. 1.3 сушильных установок имеют обоснованные их авторами параметры и режимы работы, полученные в результате расчёта по известным методикам. Данные методики основаны на эмпирических методах и зачастую в них не учитывается даже характер протекания сушильного агента. На наш взгляд это серьёзное упущение, требующее решения, так как при разработке любой сушильной установки обязательно нужно увидеть всю картину теплофизических и гидродинамических процессов, протекающих в ней. Иначе полученные результаты могут быть подвергнуты сомнению в результате не учёта каких-либо процессов. Важно также учитывать все геометрические параметры установки. Достичь существенного изменения в этом вопросе невозможно без математического моделирования всех основных протекающих при сушке процессов. Многими авторами при теоретическом рассмотрении вопроса отмечается сложность решения некоторых уравнений. Действительно, процессы тепло и влагопереноса непросты и для своего решения в виде полей распределения искомых величин в рамках интересующей геометрической постановки требуют задействования современных мощных вычислительных средств и программных продуктов. На сегодняшний день имеется широкий ряд таких программных решений позволяющих решать многие физические, а под час, как в нашем случаи, мультифизические задачи.

Среди них можно выделить Comsol Multiphysics, ANSYS и другие. Единственным их недостатком является высокая стоимость и дорогое техническое обслуживание, без которого трудно обойтись, так как данные программы сложны и имеют множество нюансов для непосвящённого пользователя. Несмотря на это, сделать качественный скачок в рассматриваемой тематике без их использования невозможно. Считаем необходимым разработать математические модели процессов тепло- и влагопереноса в сушильной камере при сушке перги учитывающие геометрические размеры установки, параметры высушиваемого продукта среди которых стоит отметить пористость и проницаемость, тип движения сушильного агента. А также необходимо провести математическую обработку полученных моделей с помощью современных программных средств во времязависимой постановке для исследования процессов сушки в динамике.

1.5 Выводы и задачи исследований

Таким образом, как видно из проведённого обзора имеющихся на сегодняшний день технических средств для сушки перги, несмотря на многие исследования, проводимые в этой области, остаётся ещё ряд нерешённых задач. Стоит выделить следующие положения.

1. Большой вклад в развитие сушильных установок для сушки непосредственно перги, как в сотах, так и в гранулах внесли учёные ФГБОУ ВО Рязанского государственного агротехнологического университета имени П. А. Костычева. На протяжении десятилетий ими исследуются и совершенствуются различные способы сушки и установки для их осуществления. Проводимые исследования направлены на снижение энергозатрат, сохранение полезных свойств перги. Тем не менее вопрос

эффективной сушки этого продукта всё ещё открыт и требует новых решений.

2. В настоящий момент не разработаны математические модели по учёту процессов тепло- и влагопереноса внутри сушильной камеры, непосредственно в самом продукте, отсутствует описание характера движения сушильного агента, отсутствуют уточнённые параметры исследуемого продукта, такие как пористость и проницаемость, равновесное влагосодержание.

3. Обработка мультифизических математических моделей невозможна без применения современных средств моделирования и ПО.

4. Среди всех способов сушки пчелиной перги наиболее адекватным к реальным условиям является конвективный способ. В литературных источниках отсутствуют такие важные параметры слоя гранул пчелиной перги, как пористость и проницаемость её слоя сушильным агентом, а также изотерма сорбции влаги. Недостаточно изучена комбинация конвективного способа с ИК-нагревом.

Проблема состоит в следующем. С одной стороны на рынке имеется достаточное количество сушилок для перги и существует много научных работ по исследованию и совершенствованию сушильных установок для этого продукта, но с другой стороны они имеют высокие энергозатраты и часто выходной продукт имеет большой разброс по относительной влажности между лотками в камере и сопровождается длительным временем сушки.

Научная гипотеза. Возможна разработка сушильной установки пчелиной перги с эффективными режимами работы и рациональными параметрами комбинированного нагрева и использования современного ПО для исследования и моделирования внутренних процессов тепло- и влагопереноса.

Цель работы. Обоснование эффективных режимов работы сушильной установки пчелиной перги с рациональными параметрами комбинации

конвективного и инфракрасного нагрева для повышения качества продукта и сокращения времени технологического процесса.

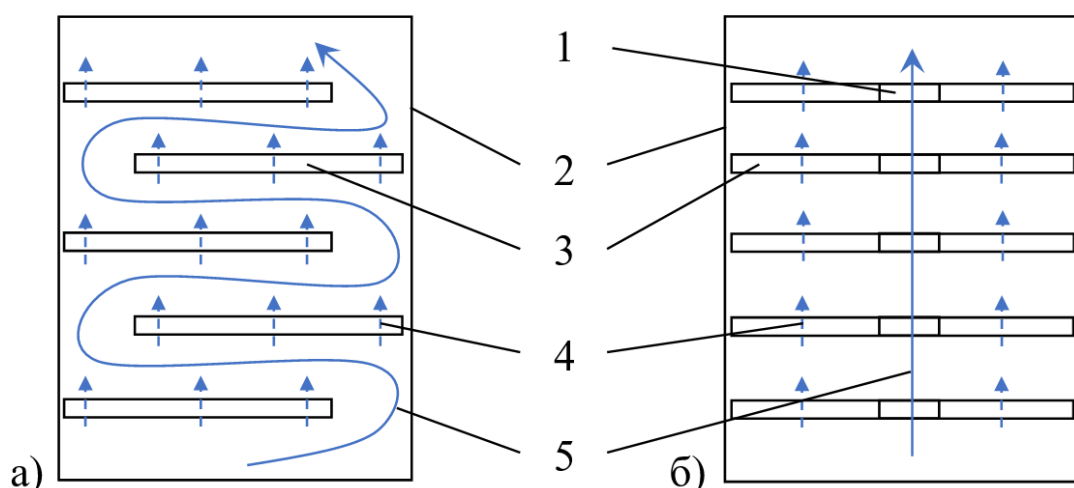
Задачи исследований.

1. Определить способы интенсификации удаления влаги из продукта и получения равномерности сушки по всему объёму сушильной камеры.
2. Разработать математические модели процессов тепло- и влагопереноса внутри сушильной камеры вызванных комбинацией конвективного и инфракрасного (ИК) способов нагрева.
3. Определить пористость и проницаемость слоя гранул пчелиной перги, а также изотерму сорбции влаги рассматриваемого продукта.
4. Провести реализацию полученных моделей в программном обеспечении и на их основе обосновать эффективные режимы работы и рациональные параметры комбинированного нагрева в сушильной установке гранул пчелиной перги.
5. Изготовить сушильную установку для гранул пчелиной перги с комбинированным нагревом и провести эксперименты по подтверждению рациональных параметров процесса сушки с эффективными режимами работы.
6. Разработать алгоритм и программу управления для контроллера, а также принципиальную электрическую схему управления сушильной установкой гранул пчелиной перги с комбинированным нагревом.
7. Провести расчет экономической эффективности применения сушильной установки гранул пчелиной перги с комбинированным нагревом.

2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- И ВЛАГОПЕРЕНОСА В СУШИЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ С КОМБИНИРОВАННЫМ НАГРЕВОМ

2.1 Определение способов интенсификации удаления влаги из гранулированной пчелиной перги и увеличения равномерности сушки во всём объёме сушильной камеры

Проведённый литературный обзор в предыдущей главе показал, что совершенствование конвективных сушильных установок, как наиболее подходящих для сушки гранул пчелиной перги ввиду сохранения полезных свойств в продукте, шло от простого продувания продукта нагретым воздухом, что ведёт к энергозатратам и бесполезному расходу сушильного агента, до создания систем рекуперации воздуха внутри установки и осциллирующих режимов работы. Последние хоть и снижают энергозатраты, по нашему мнению, значительно увеличивают время сушки гранул перги. Создание же систем рекуперации видится нам, как наиболее перспективный способ интенсификации удаления влаги из гранул перги, но при этом имеет ряд проблем, заключающихся в том, что нижние лотки в сушильной камере вновь увлажняются влагой, поступающей из байпаса от верхних лотков. Комбинация системы рекуперации с осциллирующим режимом в установке Д.Е. Каширина показывает снижение энергозатрат на сушку, но опять-таки увеличивает её время. Поэтому в первую очередь необходимо убрать или сократить отрицательное влияние эффекта переувлажнения нижних лотков. Сделать это можно, изменив направление потока сушильного агента, так чтобы он уносил с собой влагу не через сам продукт. Например, создав циркуляцию потока между лотками разместив их зигзагообразно (рис. 2.1 а) или сделав небольшие сквозные отверстия в них для прохода сушильного агента (рис. 2.1 б). По нашему мнению, такая конструкция также приведёт и к более быстрому выравниванию поля температур внутри сушильной камеры в начальный момент сушки гранул пчелиной перги.



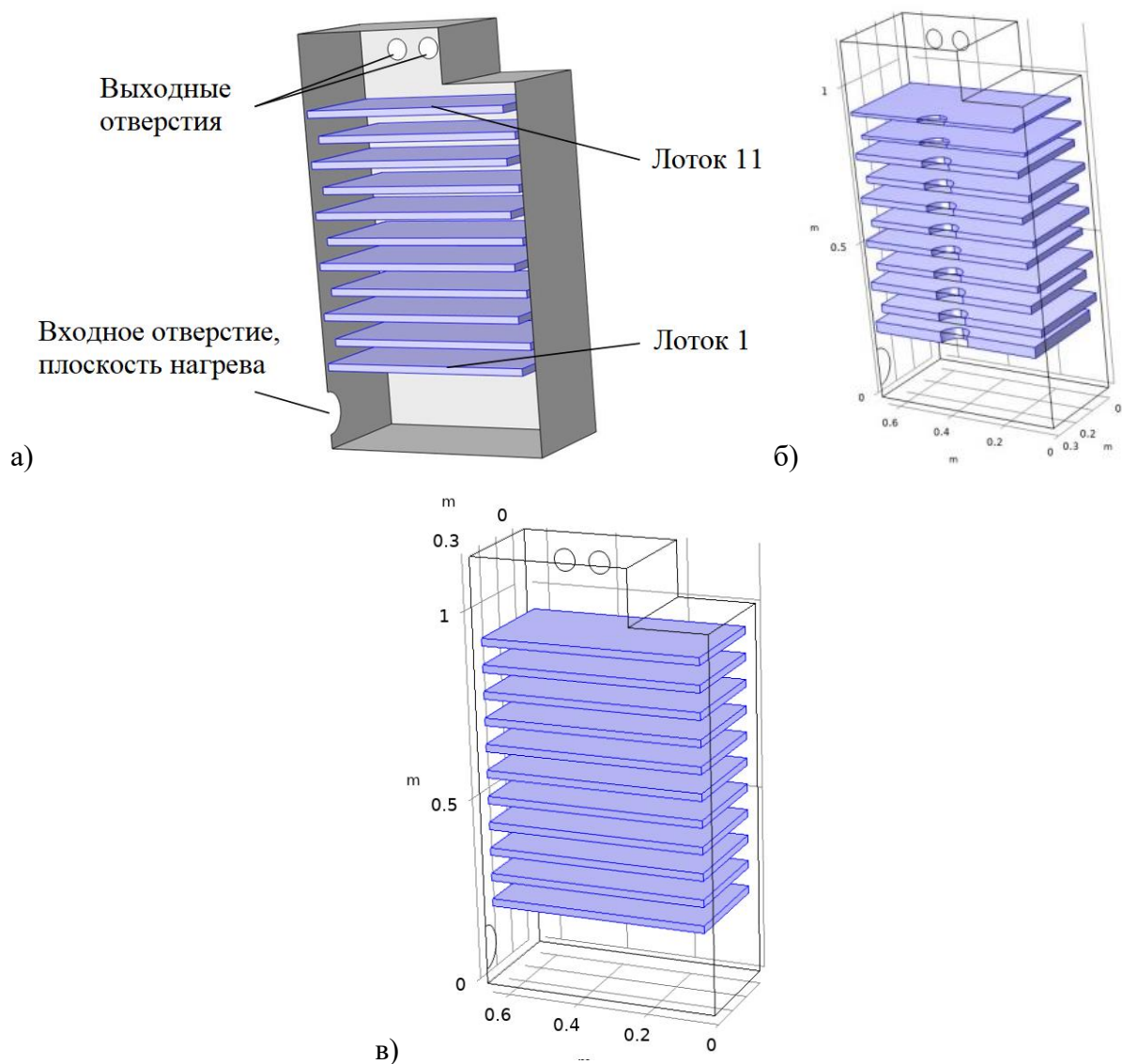
а) при расположении лотков зигзагообразно, б) при отверстиях в лотках

1 – отверстие в лотке, 2 – сушильная камера, 3 – лоток с гранулами пчелиной перги, 4 – воздушный поток через слой перги, 5 – основной поток сушильного агента

Рисунок 2.1 – Изображение вариантов изменения потока сушильного агента:

Интенсифицировать процесс также возможно путём подачи в первый период сушки дополнительной тепловой энергии. Поступление повышенного тепла в первый период позволит быстрее нагреться исходному материалу до установленной температуры и раньше начать процесс испарения.

Для анализа предложенных выше идей, с целью сокращения временных и финансовых затрат на изготовление необходимого оборудования, было решено провести их реализацию с помощью математического моделирования на примере типичной конструкции сушильной камеры, используемой пчеловодами Краснодарского края (рис. 1.13). Её геометрическая модель представлена в трёх вариантах на рис. 2.2. В первом варианте лотки с пергой, смещены относительно друг друга таким образом, чтобы сформировать зигзагообразный канал (рис. 2.2 а). Во втором варианте помимо зигзагообразного канала в лотках сделаны отверстия для прохода сушильного агента (рис. 2.2 б). В третьем лотки располагаются друг под другом без зигзага и этот вариант является контрольным (рис. 2.2 в).



а) геометрическая модель с зигзагообразным расположением лотков с пергой,

б) геометрическая модель с зигзагообразным каналом и отверстиями в лотках

в) контрольный вариант с размещением лотков строго друг под другом

Рисунок 2.2 – Изображения вариантов геометрических моделей исследуемого объекта

Для решения моделей процессов тепло- и влагопереноса внутри сушильной установки были приняты следующие допущения.

1. Геометрическая модель представляет из себя половину установки для экономии вычислительных средств и сокращения времени расчёта.

2. Каждый лоток и слой перги гранул в нём представлен единым пористым телом в виде 11 параллелепипедов нумерация которых идёт сверху вниз. Теплопроводностью самих лотков пренебрегаем.
3. Входное отверстие представляет из себя круглую плоскость, расположенную внизу, и она же является плоскостью нагрева, на которой будет задана выделяемая нагревателем мощность.
4. Сверху установки имеется два круглых отверстия для выхода сушильного агента согласно конструкции установки показанной на рис. 1.13.
5. Верхний отсек, отделённый от сушильной камеры и в котором располагается система автоматики не участвует в расчёте.
6. Для моделирования потоков сушильного агента использовались уравнения Навье-Стокса в постановке для ламинарного течения сжимаемой жидкости. Средняя скорость во входном сечении была задана равной 1,5 м/с. Уравнения Навье-Стокса были реализованы с помощью интерфейса Laminar Flow.
7. Изотерма сорбции влаги в перге, а также её проницаемость в модели не учитывались.
8. Предполагалось, что в перге влага содержится в виде пара и воды, причём соблюдается условие:

$$s_{ж} + s_{п} = 1, \quad (2.1)$$

где $s_{ж}$ - коэффициент насыщения пор перги водой; $s_{п}$ - коэффициент насыщения пор перги паром.

Коэффициент насыщения пор перги водой определяется по формуле:

$$s_{ж} = \frac{c_{ж} M_{ж}}{\rho_{ж} \varepsilon}, \quad (2.2)$$

где $c_{ж}$ – концентрация влаги в перге, моль/м³; $M_{ж}$ – молярная масса воды, кг/моль; $\rho_{ж}$ – плотность воды, кг/м³; ε - пористость перги в рамках (в модели принята равной 0,5).

9. Ко всем внешним плоскостям модели, кроме плоскости симметрии применимо условие теплоизоляции.

Основное уравнение движения тепловых потоков было представлено в следующем виде:

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \rho \cdot c_p \cdot u \cdot \nabla T + \nabla q = \sum Q_h, \quad (2.3)$$

где c_p – теплоемкость среды, Дж/(кг·°C); u – скорость потока, м/с; $q = -k \nabla T$ – плотность теплового потока, Вт/м²; k – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°C); $\sum Q_h$ – общая интенсивность тепловыделений, Вт/м³; T – температура, °C.

Решение уравнений движения осуществлялась с помощью интерфейса «Heat Transfer in Fluids». Транспорт влаги был реализован с помощью интерфейса «Transport in Diluted Species». Основное уравнение, решаемое в нём:

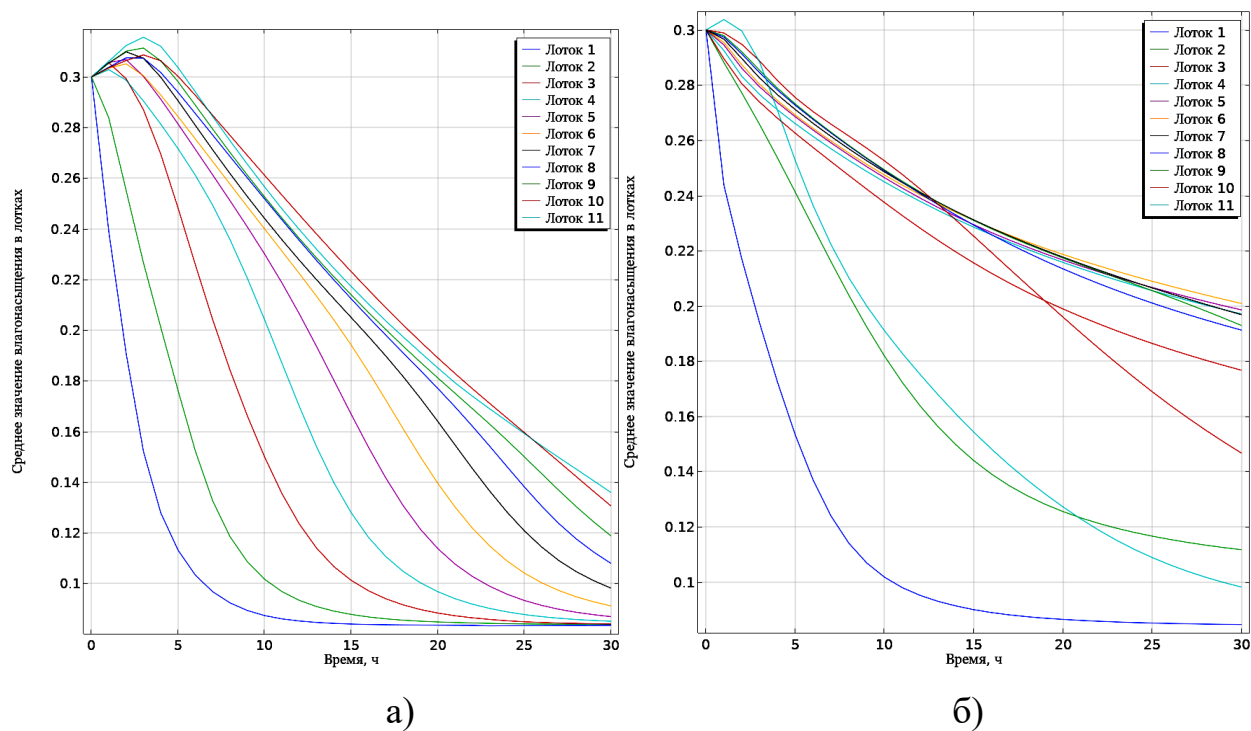
$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \nabla \cdot (-D_i \nabla c_i) + u \cdot \nabla c_i = 0, \quad (2.4)$$

где c_i – концентрация i -го вещества, моль/м³; D – коэффициент диффузии i -го вещества м²/с.

Моделирование проходило в 2 этапа: на первом – рассчитывалось стационарное поле скоростей теплоносителя внутри установки с помощью уравнений Навье-Стокса, а на втором – нестационарный расчёт тепло- и влагопереноса на базе уравнений (2.3) и (2.4). Мощность нагревателя (выделяемая в модели на плоскости входного отверстия согласно принятым ранее допущениям) была задана равной 400 Вт. При этой мощности перга в модели не нагревалась выше 40-41 °C. Начальное насыщение воздуха и перги влагой было равно 30%, начальная температура 20 °C.

Вначале был смоделирован вариант с зигзагообразным каналом и сравнён с контрольным вариантом. Приемлемой влажностью гранул пчелиной перги, как говорилось в п. 1.1 считается влажность менее 18%. По полученным результатам для сушильной камеры с зигзагообразным каналом

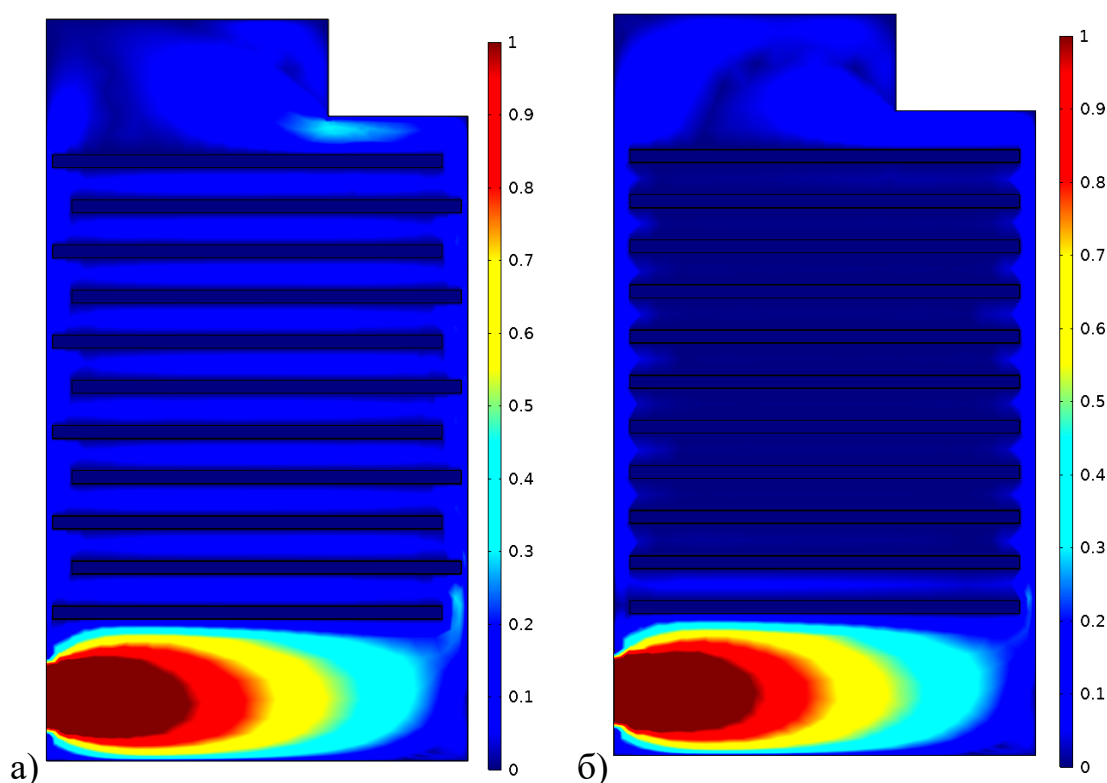
через 16-17 часов нижняя половина рамок с пергой (рамки с 1 по 5) уже достигают среднего значения влагонасыщения $S_{ж}$ менее 15%. К 30 часу сушки максимальное значение этого показателя составило 14% (рис. 2.3 а). В случае контрольного варианта к 30 часу сушки максимальное значение влагонасыщения наблюдалось в верхних лотках и составило 20%. Как видно между сравниваемыми вариантами наблюдается расхождение как во времени сушке, так и в её равномерности. Наилучшим является вариант с зигзагообразным каналом, что подтверждает предложенную нами идею. Но всё же неравномерность между нижними и верхними лотками даже в этом случае существенная.



а) при зигзагообразном канале, б) при расположении лотков строго друг под другом
Рисунок 2.3 – Графики изменения среднего значения влагосодержания $s_{ж}$ в лотках с пергой во времени

На рисунке 2.4 показаны результаты расчёта гидродинамической задачи в сушилке с зигзагообразным каналом (рис. 2.4 а) и без него (рис. 2.4 б) в виде полей распределения скоростей сушильного агента внутри установки. Для лучшей наглядности отображения скоростей теплоносителя

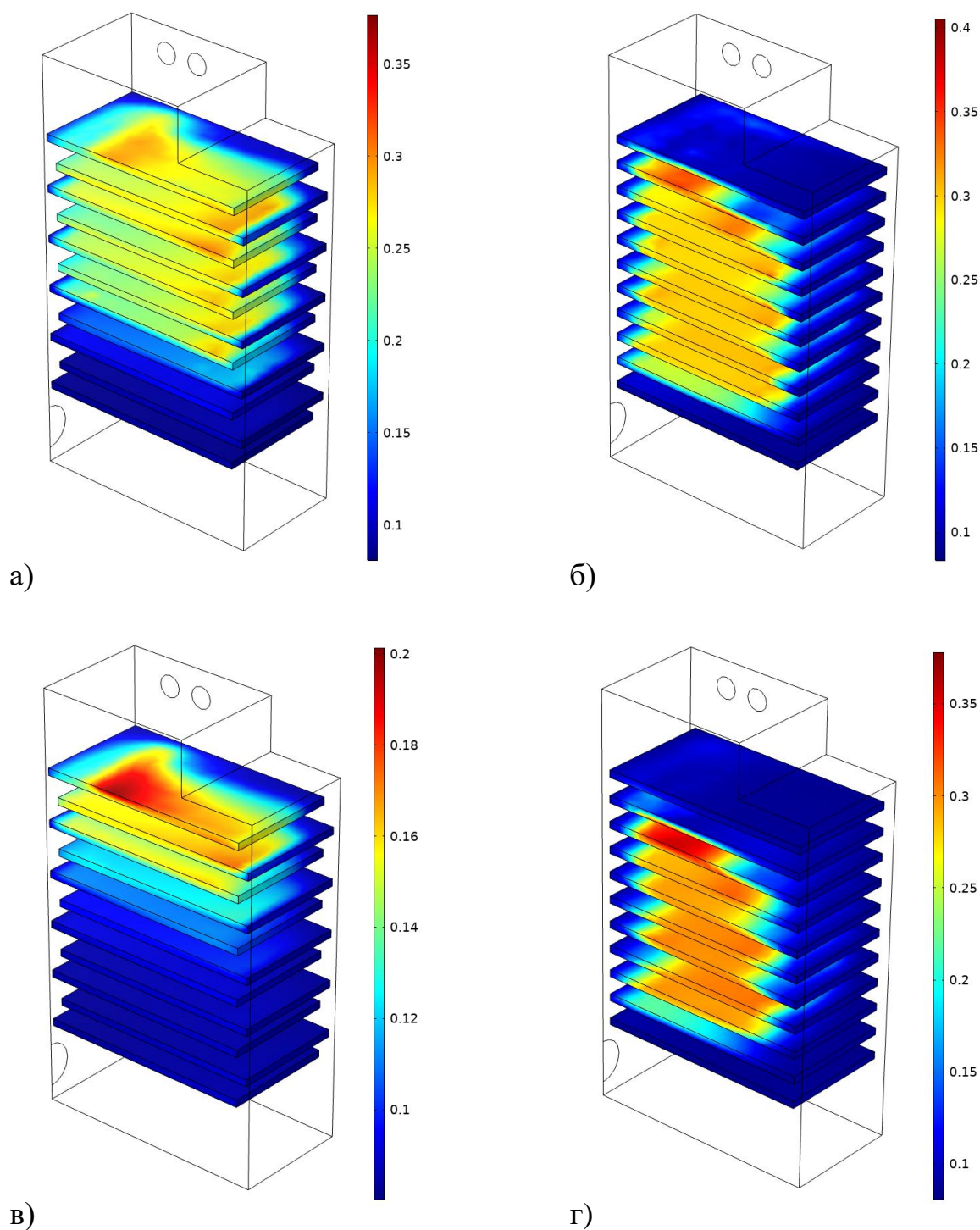
между лотками на данных изображениях была отфильтрована скорость в диапазоне от 0 до 1 м/с. Как видно наибольшие скорости находятся внизу сушильной камеры. В сушилке с зигзагообразным каналом часть потока теплоносителя обдувает поверхность слоя перги со скоростью 0,13 – 0,15 м/с (рис. 2.4 а). В случае же со стандартным расположением лотков эти скорости практически не превышают 0,1 м/с. Таким образом, наличие зигзагообразного канала позволяет увеличить обдув перги в лотках теплоносителем в 1,5 раза.



а) с зигзагообразным каналом, б) с расположением лотков чётко друг под другом

Рисунок 2.4 – Изображения полей распределения скоростей воздуха внутри сушильной камеры

Также примечателен вид полей распределения влагонасыщения $s_{ж}$ в каждом из лотков (рис. 2.5). В случае расположения лотков чётко друг под другом влага скапливается во внутренних лотках и такое положение дел сохраняется в сушильной камере в течении всего времени (рис. 2.5 б, г). В случае же зигзагообразного канала влага удаляется постепенно сверху вниз.



а), в) с зигзагообразным каналом через 15 и 30 часов соответственно,
 б), г) с расположением лотков чётко друг под другом через 15 и 30 часов соответственно

Рисунок 2.5 – Вид полей распределения влагонасыщения $s_{ж}$ в каждом из лотков сушильной камеры

Далее был исследован вариант сушильной установки, в лотках которой были сделаны отверстия. Как видно из рис. 2.6 влагонасыщение перги $s_{ж}$

изменяется более равномерно. На графиках видно, что разница между нижними и верхними лотками гораздо меньше по сравнению с вариантом для зигзагообразного канала (рис. 2.3 а). Так если через 30 часов сушки в сушилке с зигзагообразным каналом разница влажности перги, находящейся в верхнем и нижнем лотках, составляла 0,06% (рис. 2.3 а), то при лотках с отверстиями она составляет 0,02% (рис. 2.6). Также если проанализировать изменение влажности перги в лотках через 15 часов в сушилке с зигзагообразным каналом, то видно, что разница составила 0,15%, с отверстиями – 0,05%.

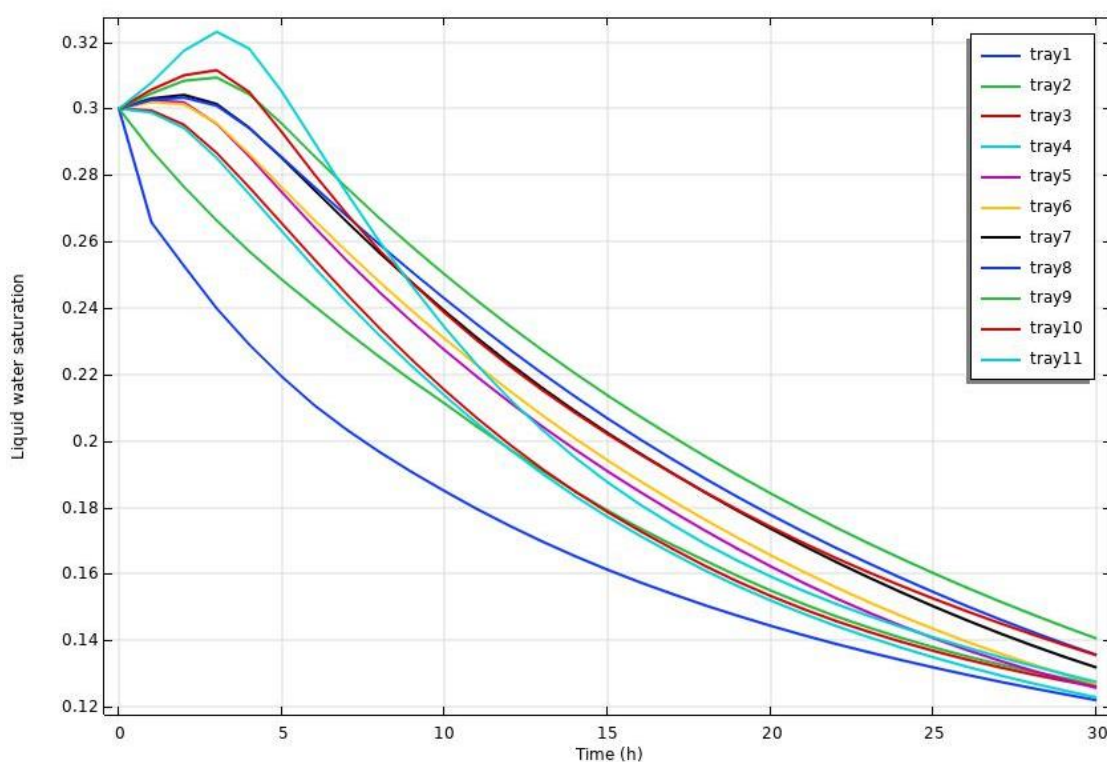


Рисунок 2.6 – Графики изменения влажности перги в процессе сушки по 11 лоткам с отверстиями в центре

Несмотря на положительный результат, наличие отверстий в лотках имеет существенный недостаток – снижение объёма высушиваемой перги за раз. Поэтому считаем, что наилучшим вариантом, при котором возможно без существенных проблем модифицировать уже имеющиеся у пчеловодов Краснодарского края установки, будет расположение лотков с пергой

зигзагообразно и добавление в сушильную камеру системы рекуперации, представляющую из себя два вентиляционных канала, которые связывают верхнюю часть сушилки с нижней и располагаются слева и справа от электрокалорифера. Для улучшения циркуляции теплоносителя через систему рекуперации, целесообразно установить сверху каждого канала вентиляторы.

Ещё один вариант исследования одного из режимов работы рассматриваемой сушильной камеры заключался в интенсификации процесса сушки путём подачи в первый период дополнительной тепловой энергии. Моделирование проводилось для двух вариантов. В первом варианте сушка проводилась с постоянной тепловой мощностью 300 Вт, 340 Вт, 400 Вт. Во втором варианте, временно в течение 2 часов подводилась тепловая мощность 500 Вт, после чего происходил возврат на прежнюю установленную мощность. Решение математических моделей в виде графиков изменения среднего значения влагонасыщения $s_{ж}$ каждого лотка с пергой представлено на рис. 2.7, 2.8, 2.9.

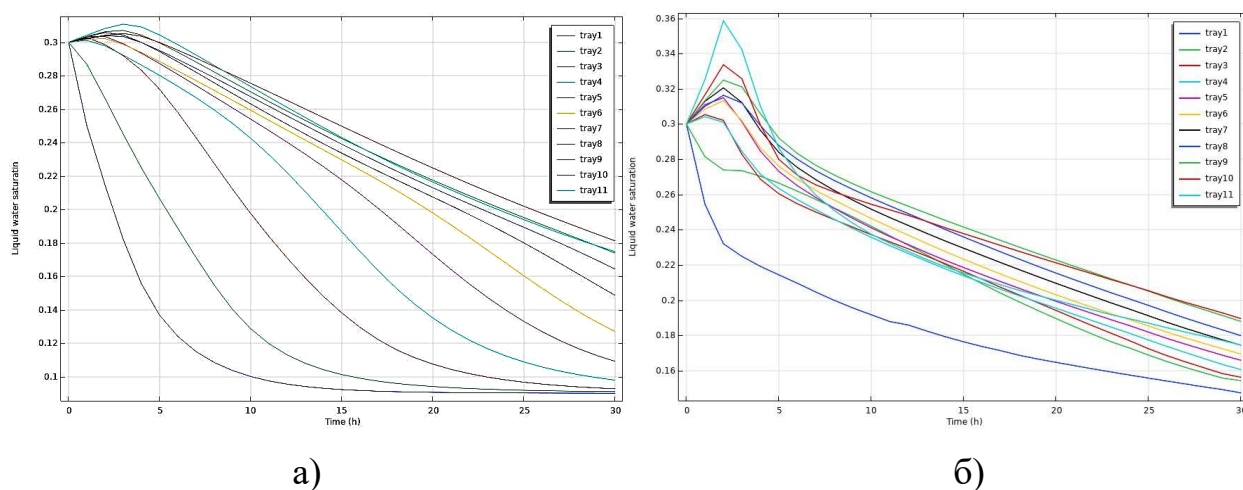


Рисунок 2.7 – Графики зависимости изменения среднего влагонасыщения $s_{ж}$ перги размещенной в отдельных лотках при подведении тепловой мощности 300 Вт в постоянном режиме (а), временной подаче повышенного тепла (б)

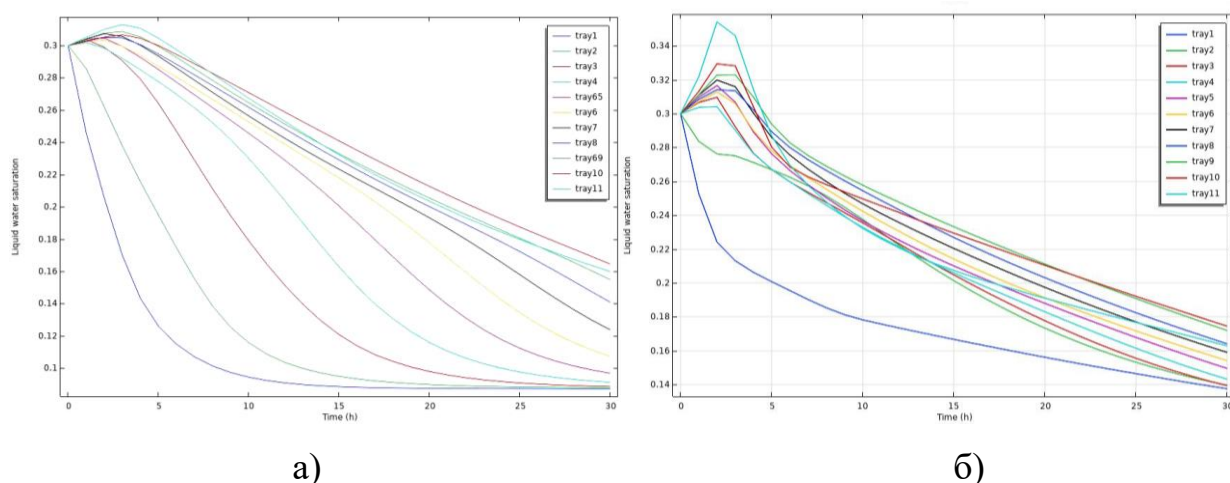


Рисунок 2.8 – Графики зависимости изменения среднего влагонасыщения $s_{\text{ж}}$ перги размещенной в отдельных лотках при подведении тепловой мощности 340Вт в постоянном режиме (а), временной подаче повышенного тепла (б)

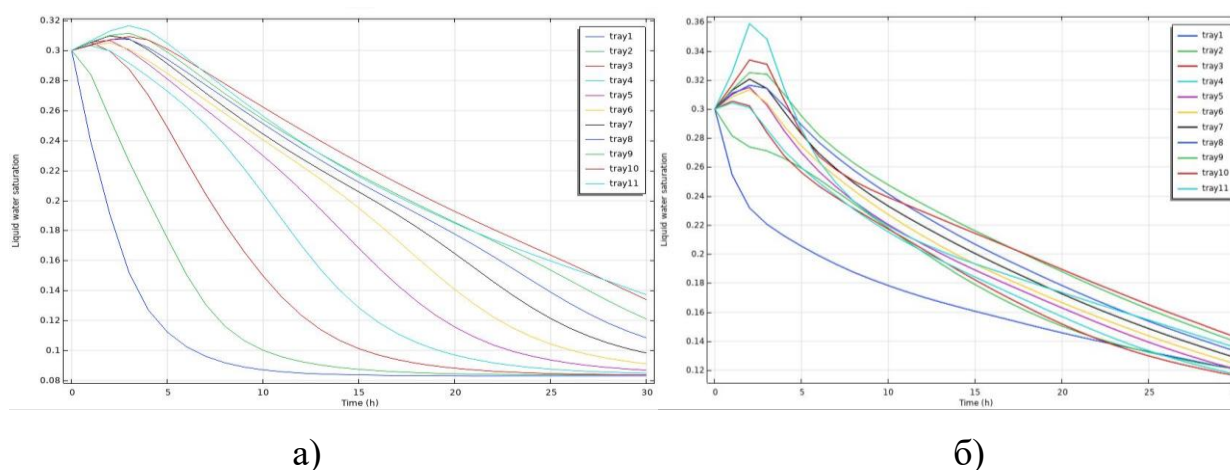


Рисунок 2.9 – Графики зависимости изменения среднего влагонасыщения $s_{\text{ж}}$ перги размещенной в отдельных лотках при подведении тепловой мощности 400Вт в постоянном режиме (а), временной подаче повышенного тепла (б)

Рисунки 2.7б, 2.8б, 2.9б отличаются более равномерной влажностью материала по всем лоткам. Если посмотреть на разницу относительных влажностей материала между лотками через 30 ч, то видно, что при поступлении мощности 300 Вт она составляет 13% (рис. 2.7а), при 340 Вт – 11% (рис. 2.8а), при 400 Вт – 6% (рис. 2.9а). Если создается временный повышенный поток тепла, то при постоянной тепловой мощности 300 Вт

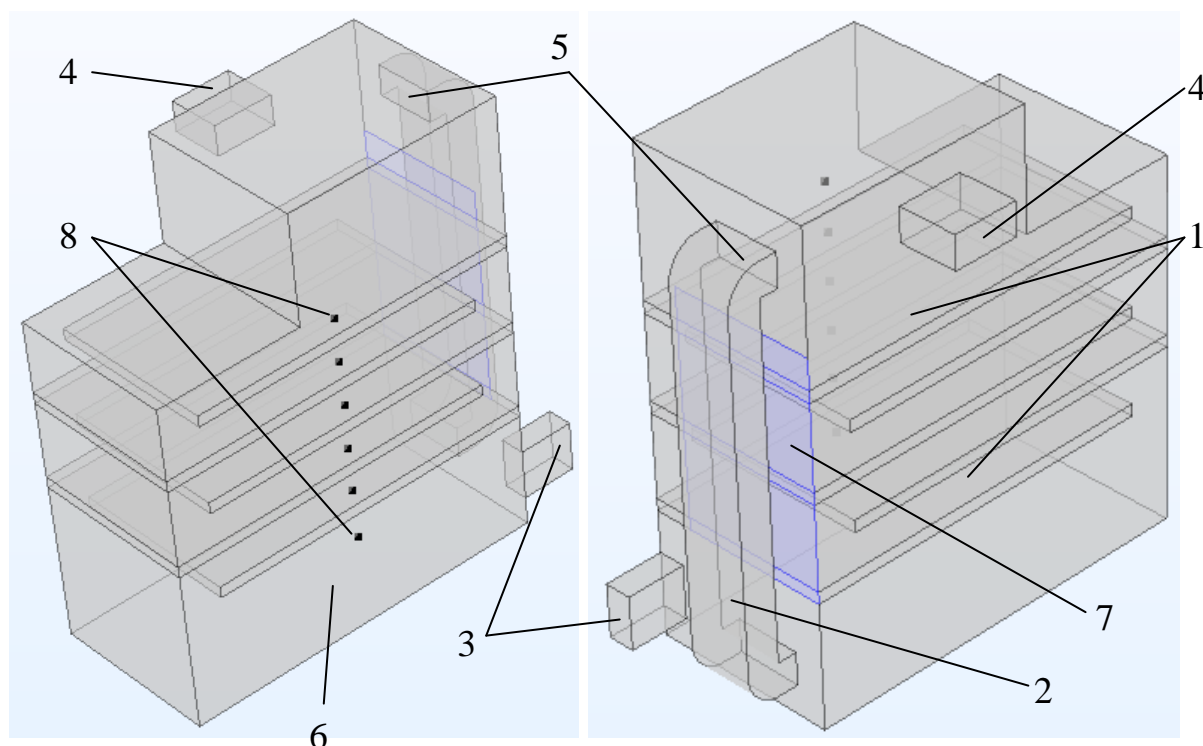
разница становится 11% (рис. 2.7б), при 340 Вт – 3% (рис. 2.8б), при 400 Вт – 2% (рис. 2.9б). Анализ рисунков 2.7а, 2.8а, 2.9а также показывает, что нижние лотки с пергой могут сильно пересыхать, а это также ухудшает качество продукции. Наблюдается большая разница по времени сушки между лотками – она находится в интервале от 20 до 26 часов. При подаче временно повышенного тепла, разница во времени составляет только 7 часов (рис. 2.7б, 2.8б, 2.9б).

Увеличение мощности в первые 2 часа сушки до 500 Вт приводит к увеличению общего энергопотребления на 4,4% (в случае подачи 300 Вт в последующие 28 часов), 3,1% (в случае подачи 340 Вт) и 1,7% (в случае подачи 400 Вт). Как видно столь незначительное увеличение общего энергопотребления существенно влияет на равномерность сушки продукта в лотках. Правда при этом есть вероятность того, что температура внутри сушильной камеры будет выше 40 °С, что чревато потерей качества продукта.

В представленных результатах решения модели, реализуемой уравнениями (2.3) и (2.4), а также уравнениями Навье-Стокса для ламинарного течения сжимаемой среды не учитываются важные характеристики слоя пчелиной перги: проницаемость и изотерма сорбции влаги. Но представленная модель отражает важные зависимости, которые дают ответ на вопрос о дальнейших рациональных изменениях сушильной камеры, а именно: создание зигзагообразного канала и системы рекуперации, о которой говорилось выше. Использование варианта с увеличением мощности в первые часы сушки неоднозначно ввиду возможности перегрева продукта. Нам видится вместо этого целесообразным добавить в сушильную камеру ИК-нагреватель по типу используемого при монтаже тёплого пола для выравнивания температурного градиента внутри установки. Это также должно способствовать снижению энергозатрат и повышению скорости сушки при несущественном усложнении конструкции.

2.2. Математические модели тепло- и влагопереноса в сушильной установке с комбинированным нагревом

Разработана геометрическая модель модернизированной сушильной камеры для дальнейшего описания и разработки математической модели физических процессов, учитывающей проницаемость слоя пчелиной перги, изотерму сорбции влаги и комбинацию конвективного и инфракрасного нагревов (рис. 2.10).



1 – перга, 2 – трубка рекуперации, 3 – входное отверстие (нагреватель), 4 – выходное отверстие, 5 – плоскость, в которой установлен вентилятор для создания рекуперации воздуха, 6 – плоскость симметрии, 7 – плоскость ИК-нагревателя (синяя), 8 – точки для контроля температуры и влажности

Рисунок 2.10 – Изображение геометрической модели модернизированной сушильной камеры

В данной геометрической модели приняты следующие допущения.

1. Как и в п.2.1 для сокращения времени расчёта модели рассматривается только половина установки, так как она симметрична.

2. Теплопроводностью металлических рамы и сетки, из которых состоят лотки пренебрегаем. Они не отображены в геометрической модели.
3. В прошлой модели ко внешним стенкам сушильной камеры было применено условие теплоизоляции, что, по нашему мнению, не совсем верно и возможно при рассмотрении задачи в первом приближении, так как в реальности не существует идеального теплоизолятора, а также невозможно покрыть им всю сушильную камеру на 100%. Поэтому для того, чтобы не усложнять модель и не добавлять дополнительных стенок все внешние поверхности, кроме плоскости симметрии будут представлены в виде тонких стенок со свойствами теплоизоляционного материала, а передача тепла во внешнюю среду через стенки будет описана с помощью соответствующих граничных условий.
4. Входное и выходное отверстие представлены в виде плоскостей, принадлежащих вытянутым прямоугольным каналам, которых в действительности нет в реальной установке. Это связано со сходимостью расчёта при дальнейшем корректном задании в модели входных и выходных гидродинамических условий [4].
5. Плоскость входного отверстия является и источником нагрева.

В модели представлены 6 точек, которые будут выполнять роль датчиков и в будущем в реальной установке в этих точках будут расположены датчики температуры с индексом Т и влажности с индексом Н (рис. 2.11).

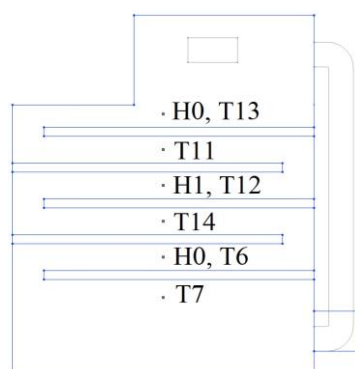


Рисунок 2.11 – Схема расположения и наименования датчиков температуры Т и влажности Н в модели и в будущей реальной установке

Для дальнейшего описания установки далее по тексту принято, что нумерация лотков осуществляется снизу вверх (т.е. нижний лоток в установке является первым, а самый верхний пятым).

Рассмотрим процессы транспорта влаги, протекающие в основных областях сушильной камеры. Как было принято в п. 2.1 геометрическая модель представлена двумя областями: пористым телом - пергой и влажным воздухом. Влага в воздухе представляет из себя пар, тогда, как в пористом теле помимо пара, влага представлена в виде свободной жидкости, находящейся в не связанном состоянии с продуктом - пергой. Это так называемая адсорбированная влага (по классификации академика П.А. Ребиндера). Она удерживается на поверхности продукта. Перенос влаги связан с конвекцией и диффузией. Рассмотрим процессы переноса влаги в каждой из областей.

Перенос влаги в воздушной части сушильной камеры может быть описан следующим уравнением, которое учитывает изменение плотности влажного воздуха ρ_{BB} :

$$M_{\Pi} \rho_{BB} \frac{\partial \left(\frac{c_{\Pi}}{\rho_{BB}} \right)}{\partial t} + M_{\Pi} \rho_{BB} u_{BO3} \cdot \nabla \left(\frac{c_{\Pi}}{\rho_{BB}} \right) + \nabla g_d = G, \quad (2.5)$$

где ρ_{BB} - плотность влажного воздуха, кг/м³; u_{BO3} - скорость воздуха, м/с;

M_{Π} - молярная масса водяного пара, кг/моль; c_{Π} - концентрация водяного пара, моль/м³; G - источник (поглотитель) влаги, кг/(м³·с); g_d - диффузионный поток пара, кг/(м²·с).

Для описания скоростей воздуха u_{BO3} внутри сушильной камеры необходимо определить число Рейнольдса Re . Согласно разработанной геометрической модели, входной канал имеет квадратное сечение со стороной, a равной 0,09 м, тогда:

$$Re = (u_{CP} \cdot a) / \nu_{BO3}, \quad (2.6)$$

где u_{CP} - средняя скорость на входе в сечение, м/с; ν_{BO3} - кинематическая вязкость воздуха, равна $1,51 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ при температуре воздуха 20°C .

Согласно представленной выше формуле, в нашем случае, течение будет ламинарным ($Re < 2300$), если $u_{CP} < 0,39 \text{ м/с}$. Поэтому примем, что режим течения турбулентный, так как скорости, создаваемые вентилятором электрокалорифера в рассматриваемой установке в среднем, могут составлять от 1 до 2 м/с.

Для описания турбулентного режима течения воздуха воспользуемся хорошо зарекомендовавшей себя при расчёте систем охлаждения электронных установок моделью Algebraic $yPlus$ [5]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \rho_{BB}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_{BB} u_{BO3}) = 0 \\ \rho_{BB} \frac{\partial u_{BO3}}{\partial t} + \rho_{BB} u_{BO3} \nabla u_{BO3} = \\ = -\nabla p + \nabla \left((\mu_{BB} + \mu_T) \left(\nabla u_{BO3} + (\nabla u_{BO3})^T - \frac{2}{3} (\mu_{BB} + \mu_T) (\nabla u_{BO3}) I \right) \right) + \rho_{BB} g \\ u^+ = y^+ \text{ при } y^+ \leq y^* \\ u^+ = y^* + \frac{1 - \sqrt{1 + 4\kappa^2 (y^+ - y^*)^2}}{2\kappa^2 (y^+ - y^*)^2} + \\ + \frac{1}{\kappa} \ln(\sqrt{1 + 4\kappa^2 (y^+ - y^*)^2} + 2\kappa(y^+ - y^*)) \text{ при } y^+ > y^* \\ y^* = B - \frac{1}{\kappa} (\ln(4\kappa) - 1) \\ Re = \frac{u_{BO3} y}{\nu_{BO3}} = u^+ y^+ \\ \mu_T = 0 \text{ при } y^+ \leq y^* \\ \mu_T = \mu \left(\frac{-1 + \sqrt{1 + 4\kappa^2 (y^+ - y^*)^2}}{2} \right) \text{ при } y^+ > y^* \end{array} \right. , (2.7)$$

где μ_{BB} - коэффициент динамической вязкости влажного воздуха, Па·с; p - давление, Па; I - единичный вектор; g - сила тяжести; μ_T - турбулентная вязкость, Па·с; u^+ - скорость у стенки, безразмерная величина; y^+ -

расстояние от стенки, безразмерная величина; κ , B - константы равные соответственно 0,402 и 6,59; y - координата нормальная к стенке, м.

Данная модель турбулентного потока характеризуется невысокими требованиями к вычислительным ресурсам и соответственно более быстрой сходимостью по сравнению с имеющимися на сегодняшний день другими моделями турбулентности. Она основана на теории смешения Прандтля и относится к алгебраическим моделям турбулентности [21].

Диффузионный поток пара может быть определён по формуле:

$$g_d = -M_{\Pi} \rho_{BB} D \nabla c_{\Pi}, \quad (2.8)$$

где D - коэффициент диффузии пара в воздухе, $D = 2,6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$.

Концентрация водяного пара:

$$c_{\Pi} = \phi \cdot c_{\text{нп}}, \quad (2.9)$$

где ϕ - относительная влажность воздуха, отн. ед.; $c_{\text{нп}}$ - концентрация насыщенного пара, моль/м³.

Концентрация насыщенного пара равна:

$$c_{\text{нп}} = \frac{P_{\text{нп}}}{RT}, \quad (2.10)$$

где $P_{\text{нп}}$ - давление насыщенного пара, Па; R - газовая постоянная, $R = 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot ^\circ\text{C})$; T - температура воздуха, $^\circ\text{C}$.

Давление насыщенного пара можно определить по формуле Тентенса [99] и тогда формула (2.10) примет вид:

$$c_{\text{нп}} = \frac{610,7 \cdot 10^{\frac{7,5(T-273,15)}{T-38,85}}}{RT}. \quad (2.11)$$

Для описания процесса переноса влаги в перге принимаем следующие допущения.

1. Как и в предыдущей модели считаем, что в перге влага содержится в виде пара и воды, причём сохраняется равенство (2.1).

2. Удаление влаги из перги осуществляется на границе раздела фаз между областью занятой пергой и воздушной областью. Таким образом,

пренебрегаем смещением положения зоны испарения в процессе сушки внутрь перги.

3. Перга представлена в виде пористого тела, поры которого представляют из себя пространство, образованное гранулами продукта.

4. Капиллярным эффектом в перге, пренебрегаем ввиду относительно больших пор, образуемых гранулами продукта.

5. Влага в перге удерживается на её поверхности с помощью адсорбции.

Согласно принятым допущениям, общее содержание влаги в перге определяется, как функция влагосодержания w от относительной влажности воздуха ϕ :

$$w(\phi) = \varepsilon \cdot s_{ж} \rho_{ж} + \varepsilon \cdot \rho_{вв} \omega_{п} (1 - s_{ж}), \quad (2.13)$$

где ε - пористость, отн. ед.; $\rho_{ж}$ - плотность воды, кг/м³; w - влагосодержание, кг/м³; $\omega_{п}$ - массовая доля паров во влажном воздухе.

Тогда уравнение, описывающее перенос влаги в перге:

$$\frac{\partial w(\phi)}{\partial t} + \rho_{вв} u_{воз} \nabla \omega_{п} + \nabla g_{дп} + u_{ж} \nabla \rho_{ж} = 0, \quad (2.14)$$

где $g_{дп}$ - диффузионный поток пара в перге, кг/(м²·с); $u_{ж}$ - скорость перемещения свободной влаги в перге, м/с.

Массовая доля паров во влажном воздухе:

$$\omega_{п} = \frac{M_{п} \phi \cdot c_{пп}}{\rho_{вв}}. \quad (2.15)$$

Водонасыщение $s_{ж}$ представляет из себя отношение объёма пор, занятого водой ко всему объёму пор, и может быть определено выражением из уравнения (2.9) с использованием формул (2.5) и (2.11):

$$s_{ж} = \frac{w(\phi) - \varepsilon \cdot M_{п} c_{п}}{\varepsilon \cdot (\rho_{ж} - M_{п} c_{п})}. \quad (2.16)$$

Диффузионный поток пара в перге:

$$g_{дп} = -\rho_{вв} D_{э} \nabla \omega_{п}, \quad (2.17)$$

где $D_э$ - эффективный коэффициент диффузии пара в пористой среде, $\text{м}^2/\text{с}$.

$D_э$ может быть найден согласно модели Милингтона-Квирка:

$$D_э = \frac{(1 - s_ж) \varepsilon}{\tau} D, \quad (2.18)$$

где τ - коэффициент извилистости пор равный:

$$\tau = ((1 - s_ж) \varepsilon)^{-7/3} \varepsilon^2, \quad (2.19)$$

Скорость воды в перге $u_ж$ можно определить, зная значения проницаемости перги K и относительной проницаемости перги водой $K_{ож}$ по закону Дарси:

$$u_ж = - \frac{K_{ож} \cdot K \cdot \nabla p_A}{\mu_ж}, \quad (2.20)$$

где $K_{ож}$ - относительная проницаемость перги водой, м^2 ; p_A - абсолютное давление, Па; $\mu_ж$ - динамическая вязкость воды, $\text{Па} \cdot \text{с}$.

Относительная проницаемость продукта водой $K_{ож}$ согласно [97]:

$$K_{ож} = \left(\frac{s_ж - s_{сж}}{1 - s_{сж}} \right)^3, \text{ при } s_ж > s_{сж}, \quad (2.21)$$

$$K_{ож} = 0, \text{ при } s_ж < s_{сж}$$

где $s_{сж}$ - водонасыщение перги водой, связанной с ней;

Так как в порах присутствует вода, то значение пористости для расчёта скорости воздуха в засыпке перги будет равно:

$$\varepsilon_B = \varepsilon(1 - s_ж). \quad (2.22)$$

Скорость воздуха $u_{воз}$ в пористом теле может быть определена с помощью уравнений Бринкмана:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_B \rho_{BB}) + \nabla(\rho_{BB} \cdot u_{воз}) &= 0 \\ \frac{\rho_{BB}}{\varepsilon_B} \left(\frac{\partial u_{воз}}{\partial t} + (u_{воз} \cdot \nabla) \frac{u_{воз}}{\varepsilon_B} \right) &= \\ = -\nabla p + \nabla \left(\frac{\mu_{BB}}{\varepsilon_B} \left((\nabla u_{воз} + (\nabla u_{воз})^T) - \frac{2}{3} (\nabla u_{воз}) I \right) \right) - \left(\frac{\mu_{BB}}{K_{об} K} \right) u_{воз} + \rho_{BB} g \end{aligned} \right. \quad (2.23)$$

где K_{OB} - относительная проницаемость перги паром, м².

По [97] K_{OB} равна:

$$\begin{aligned} K_{OB} &= 1 - 1,1s_{\mathcal{K}}, \text{ при } s_{\mathcal{K}} < 1/1,1 \\ K_{OB} &= 0, \text{ при } s_{\mathcal{K}} > 1/1,1 \end{aligned} \quad (2.24)$$

Согласно представленным выше уравнениям, перенос влаги в воздухе и перге можно описать системами уравнений:

$$\left\{ \begin{aligned} &M_{\Pi} \rho_{BB} \frac{\partial \left(\frac{c_{\Pi}}{\rho_{BB}} \right)}{\partial t} + M_{\Pi} \rho_{BB} u_{BO3} \cdot \nabla \left(\frac{c_{\Pi}}{\rho_{BB}} \right) + \nabla g_{\mathcal{D}} = G \\ &\frac{\partial \rho_{BB}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_{BB} u_{BO3}) = 0 \\ &\rho_{BB} \frac{\partial u_{BO3}}{\partial t} + \rho_{BB} u_{BO3} \nabla u_{BO3} = \\ &= -\nabla p + \nabla \left((\mu_{BB} + \mu_T) \left(\nabla u_{BO3} + (\nabla u_{BO3})^T - \frac{2}{3} (\mu_{BB} + \mu_T) (\nabla u_{BO3}) I \right) \right) + \rho_{BB} g \\ &u^+ = y^+ \text{ при } y^+ \leq y^* \\ &u^+ = y^* + \frac{1 - \sqrt{1 + 4\kappa^2 (y^+ - y^*)^2}}{2\kappa^2 (y^+ - y^*)^2} + \\ &+ \frac{1}{\kappa} \ln(\sqrt{1 + 4\kappa^2 (y^+ - y^*)^2} + 2\kappa(y^+ - y^*)) \text{ при } y^+ > y^* \\ &y^* = B - \frac{1}{\kappa} (\ln(4\kappa) - 1) \\ &Re = \frac{u_{BO3} y}{v_{BO3}} = u^+ y^+ \\ &\mu_T = 0 \text{ при } y^+ \leq y^* \\ &\mu_T = \mu \left(\frac{-1 + \sqrt{1 + 4\kappa^2 (y^+ - y^*)^2}}{2} \right) \text{ при } y^+ > y^* \end{aligned} \right. \quad (2.25)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial w(\phi)}{\partial t} + \rho_{BB} u_{BO3} \nabla \omega_{\Pi} + \nabla g_{ДП} + u_{Ж} \nabla \rho_{Ж} = 0 \\ \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_B \rho_{BB}) + \nabla (\rho_{BB} \cdot u_{BO3}) = 0 \\ \frac{\rho_{BB}}{\varepsilon_B} \left(\frac{\partial u_{BO3}}{\partial t} + (u_{BO3} \cdot \nabla) \frac{u_{BO3}}{\varepsilon_B} \right) = \\ = -\nabla p + \nabla \left(\frac{\mu_{BB}}{\varepsilon_B} \left((\nabla u_{BO3} + (\nabla u_{BO3})^T) - \frac{2}{3} (\nabla u_{BO3}) I \right) \right) - \left(\frac{\mu_{BB}}{K_{OB} K} \right) u + \rho_{BB} g \end{array} \right. \quad (2.26)$$

Согласно (2.26), чтобы определить транспорт влаги в перге необходимо знать зависимость влагосодержания w от относительной влажности окружающего её воздуха ϕ или так называемую изотерму сорбции влаги. В отечественных и зарубежных литературных источниках имеется очень скудная информация по изотермам сорбции влаги в пищевых продуктах (известны для моркови, картофеля и немногих других). По пчелиной перге такой информации найти не удалось, а это значит, что необходимо определить данную зависимость экспериментально. Методика эксперимента по её определению описана в приложении 1, а результат приведён на рис. 2.12.

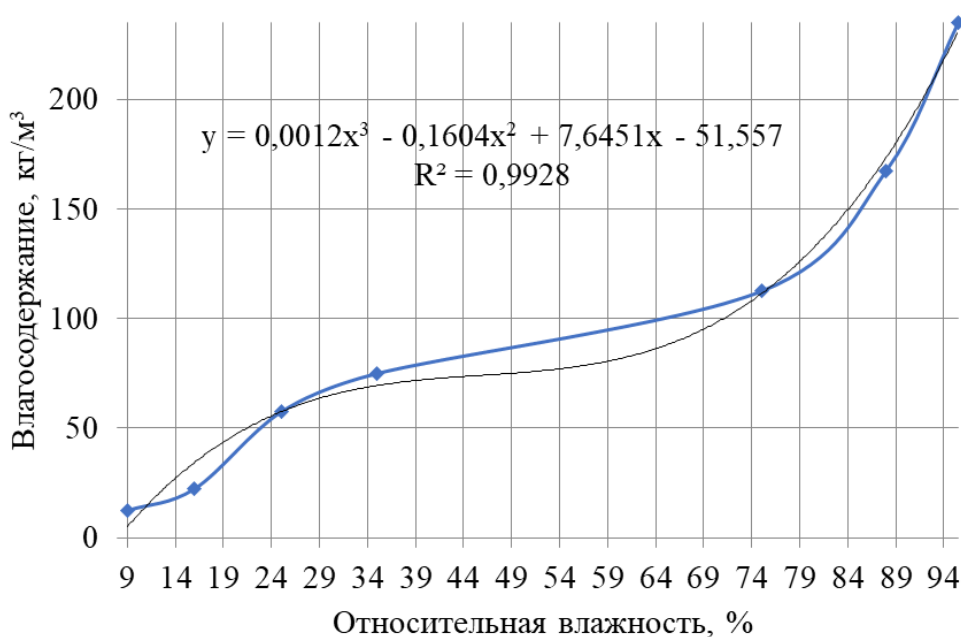


Рисунок 2.12 – Изображение графика изотермы сорбции влаги пчелиной перги в гранулах

Как видно из рисунка изотерма сорбции влаги в перге может быть аппроксимирована полиномиальной зависимостью третьей степени с достаточно высокой точностью, т.к. коэффициент детерминации составил $R^2 = 0,9928$. Уравнение регрессии выглядит следующим образом: $w = 0,0012\phi^3 - 0,1604\phi^2 + 7,6451\phi - 51,5570$.

Рассмотрим тепловые процессы в воздухе и перге. Уравнение теплового баланса для воздушной части сушильной камеры:

$$\rho_{BB} C_{BB} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_{BB} C_{BB} u_{BO3} \nabla T + \nabla q_B = Q + Q_{\Delta}, \quad (2.27)$$

где C_{BB} - теплоёмкость влажного воздуха, Дж/(кг·°C); q_B - плотность теплового потока в воздушной части сушилки, Вт/м²; Q - источник теплоты, Вт/м³; Q_{Δ} - объёмная плотность потока энтальпии вызванного диффузией водяного пара, Вт/м³.

Плотность теплового потока q равна:

$$q = -k_{BB} \nabla T, \quad (2.28)$$

где k_{BB} - теплопроводность влажного воздуха, Вт/м·°C.

Плотность влажного воздуха ρ_{BB} зависит от плотностей сухого воздуха ρ_{CB} и плотности пара ρ_{Π} , а также от температуры T , абсолютного давления p_A и концентрации пара c_{Π} :

$$\rho_{BB} = \rho_{CB} N_{CB} + \rho_{\Pi} N_{\Pi}, \quad (2.29)$$

где N_{CB} - молярная доля сухого воздуха; N_{Π} - молярная доля пара.

$$\rho_{CB} = \frac{p_A M_{CB}}{RT}, \quad \rho_{\Pi} = \frac{p_A M_{\Pi}}{RT}, \quad (2.30)$$

где M_{CB} - молярная масса сухого воздуха, кг/моль.

$$N_{CB} = 1 - N_{\Pi}, \quad N_{\Pi} = \frac{c_{\Pi} RT}{p_A}. \quad (2.31)$$

Подставляя (2.30) и (2.31) в (2.29), получаем:

$$\rho_{BB} = \frac{p_A M_{CB}}{RT} \left(1 - \frac{c_{II} RT}{p_A} \right) + M_{II} c_{II}. \quad (2.32)$$

Теплоёмкость влажного воздуха C_{BB} зависит от теплоёмкостей сухого воздуха C_{CB} и теплоёмкости пара C_{II} , а также от температуры T , абсолютного давления p_A и концентрации пара c_{II} :

$$C_{BB} = \frac{N_{CB} M_{CB} C_{CB} + N_{II} M_{II} C_{II}}{M_{CB} N_{CB} + M_{II} N_{II}}. \quad (2.33)$$

Теплопроводность влажного воздуха k_{BB} :

$$k_{BB} = \frac{N_{CB} k_{CB}}{N_{CB} + N_{II} \varphi_{CB}} + \frac{N_{II} k_{II}}{N_{CB} \varphi_{CB} + N_{II}}, \quad (2.34)$$

$$\varphi_{CB} = \frac{\left(1 + \left(\frac{\mu_{CB}}{\mu_{II}} \right)^{0,5} \left(\frac{M_{II}}{M_{CB}} \right)^{0,25} \right)^2}{\left(2\sqrt{2} \left(1 + \frac{M_{II}}{M_{CB}} \right) \right)^{0,5}}, \quad (2.35)$$

$$\varphi_{II} = \frac{\left(1 + \left(\frac{\mu_{II}}{\mu_{CB}} \right)^{0,5} \left(\frac{M_{CB}}{M_{II}} \right)^{0,25} \right)^2}{\left(2\sqrt{2} \left(1 + \frac{M_{CB}}{M_{II}} \right) \right)^{0,5}}, \quad (2.36)$$

где k_{CB} - теплопроводность сухого воздуха, Вт/м·°С; k_{II} - теплопроводность пара, Вт/м·°С; μ_{CB} - динамическая вязкость сухого воздуха, Па·с; μ_{II} - динамическая вязкость пара, Па·с.

Динамическая вязкость влажного воздуха μ_{BB} равна:

$$\mu_{BB} = \frac{N_{CB} \mu_{CB}}{N_{CB} + N_{II} \varphi_{CB}} + \frac{N_{II} \mu_{II}}{N_{CB} \varphi_{CB} + N_{II}}. \quad (2.37)$$

Поток энтальпии, вызванный диффузией водяного пара равен:

$$Q_{ЭВП} = -(C_{II} - C_{CB}) g_d \nabla T. \quad (2.38)$$

Для составления уравнения теплового баланса, описывающего тепловые процессы в перге, зададимся условием, что и жидкая и воздушная

части, которыми заполнены поры засыпки перги, имеют общую температуру T :

$$C_{\varepsilon} \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho_{BB} C_{BB} u_{BO3} + \rho_{Ж} C_{Ж} u_{Ж}) \nabla T + \nabla q_{\Pi} = Q_{\varepsilon\Pi} + Q_{исп}, \quad (2.39)$$

где $C_{Ж}$ - теплоёмкость воды, Дж/(кг·°C); q_{Π} - плотность теплового потока в перге, Вт/м²; C_{ε} - эффективная объёмная теплоёмкость, Дж/(м³·°C); $Q_{исп}$ - объёмная плотность теплового потока при испарении, Вт/м³; $Q_{\varepsilon\Pi}$ - объёмная плотность потока энтальпии вызванного диффузией водяного пара в перге, Вт/м³.

Эффективная объёмная теплоёмкость C_{ε} равна:

$$C_{\varepsilon} = \theta_{\PiГ} \rho_{\PiГ} C_{\PiГ} + \varepsilon((1 - s_{Ж}) \rho_{BB} C_{BB} + s_{Ж} \rho_{Ж} C_{Ж}), \quad (2.40)$$

где $\theta_{\PiГ}$ - объёмная доля перги; $\rho_{\PiГ}$ - плотность перги, кг/м³; $C_{\PiГ}$ - теплоёмкость перги, Дж/(кг·°C).

Плотность теплового потока в перге q_{Π} равна:

$$q_{\Pi} = -k_{\varepsilon} \nabla T, \quad (2.41)$$

где k_{ε} - эффективная теплопроводность, Вт/м·°C.

Эффективная теплопроводность k_{ε} учитывает теплопроводности всех элементов, из которых представлено пористое тело: влажного воздуха k_{BB} , воды k_B и перги $k_{\PiГ}$:

$$k_{\varepsilon} = \theta_{\PiГ} k_{\PiГ} + \varepsilon((1 - s_{Ж}) k_{BB} + s_{Ж} k_{Ж}). \quad (2.42)$$

Объёмная плотность потока энтальпии вызванного диффузией водяного пара в перге $Q_{\varepsilon\Pi}$ определяется точно также, как и в воздухе по формуле (2.28), но вместо диффузионного потока пара g_d , который определяется из формулы (2.8) будет $g_{\PiГ}$ определяемый по формуле (2.17).

Количество теплоты, выделяемое при испарении $Q_{исп}$ зависит от скрытой теплоты парообразования L_{Π} :

$$Q_{исп} = L_{\Pi} G_{исп}, \quad (2.43)$$

где $G_{исп}$ - поглощение влаги из перги испарением, кг/(м³·с).

$$G_{исп} = \frac{\partial(\varepsilon \cdot \rho_{BB} \omega_{\Pi} (1 - s_{ж}))}{\partial t} + \rho_{BB} u_{BOЗ} \nabla \omega_{\Pi} + \nabla g_{ДП}. \quad (2.44)$$

Таким образом, в общем виде тепловые процессы, протекающие в сушильной камере, можно описать следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} \rho_{BB} C_{BB} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_{BB} C_{BB} u_{BOЗ} \nabla T + \nabla q_B = Q + Q_{ЭВП} \\ C_{\varepsilon} \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho_{BB} C_{BB} u_{BOЗ} + \rho_{ж} C_{ж} u_{ж}) \nabla T + \nabla q_{\Pi} = Q_{ЭП} + Q_{исп} \end{cases}. \quad (2.45)$$

Информации о порах, формируемых засыпкой перговых гранул в литературных источниках, как уже обсуждалось в п.1.4, не было найдено. Поэтому чтобы определить данный параметр были взяты перговые гранулы и засыпаны в прямоугольный профиль размерами 11х5,5 см. Гранулы на дне данной засыпки были отсканированы и получено их изображение (рис. 2.13).

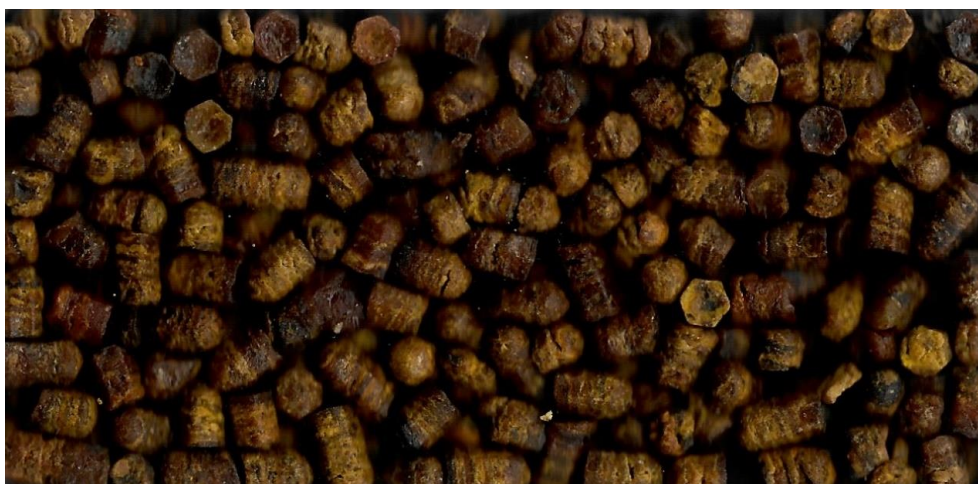


Рисунок 2.13 – Скан-изображение перговых гранул

Скан-изображение перговых гранул далее было представлено в виде монохромного, где белым цветом были обозначены сами гранулы с пергой, а чёрным пустое пространство между ними заполненное воздухом. Подсчитав площади занимаемыми чёрным и белым цветами, можно рассчитать пористость. Для этого на полученном фото вначале были удалены перговые гранулы, находящиеся на заднем плане, затем было сделано чёрно-белое

изображение и переведено в монохромное, на котором потом были убраны «шумы» в перговых гранулах (рис. 2.14).

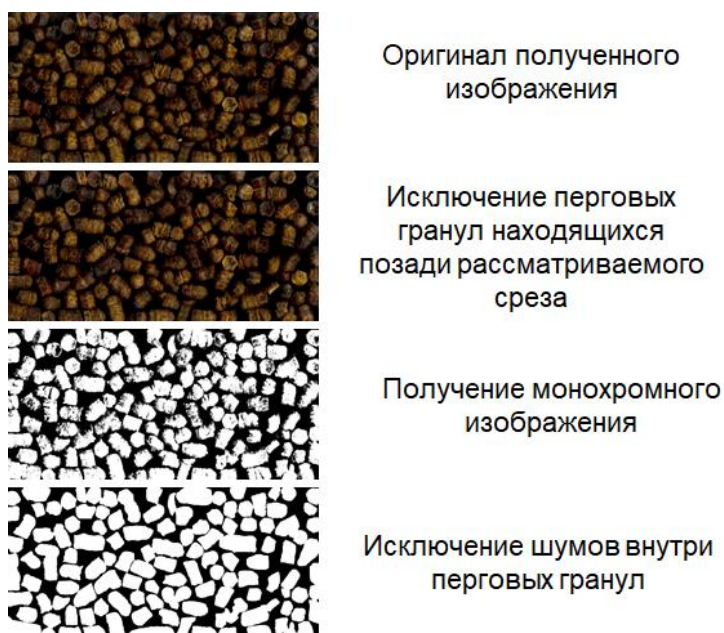


Рисунок 2.14 – Алгоритм редактирования цветного изображения засыпки перговых гранул для получения его растрового изображения

Полученное растровое изображение было загружено в ПО Comsol Multiphysics в качестве функции (рис. 2.15). Здесь все точки, попавшие в область перговых гранул равны единице, а воздушные области равны нулю. Зная площади поверхностей, которым присвоены значения нуля и единицы можем найти пористость, разделив площадь, занятую воздухом, на площадь всей исследуемой поверхности. В итоге значение пористости засыпки из перговых гранул получилось равным $\varepsilon = 0,35$.

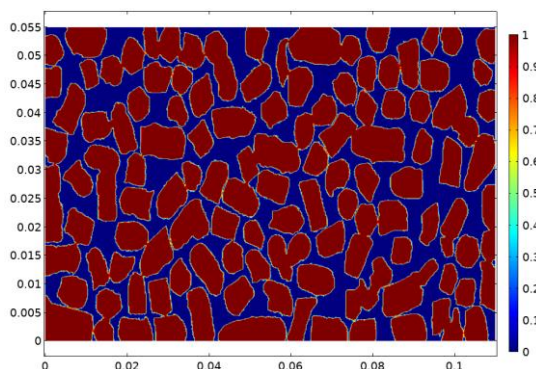


Рисунок 2.15 – Изображение перговых гранул в ПО Comsol Multiphysics в виде функции

При моделировании пористых тел помимо пористости важно знать и так называемый коэффициент проницаемости, значение которого входит в закон фильтрации жидкостей и газов в пористых телах именуемый законом Дарси. Из этого закона проницаемость определяется следующим образом:

$$K = \frac{u_{\phi} \cdot \mu_B \cdot L}{\Delta p}, \quad (2.46)$$

где K - проницаемость, м^2 ; u_{ϕ} - скорость фильтрации воздуха через слой перговых гранул, м/с ; μ_B - динамическая вязкость воздуха, $\text{Па}\cdot\text{с}$; L - характерный размер фильтрации, м ; Δp - перепад давлений, Па .

Скорость фильтрации u_{ϕ} можно определить, зная объёмный расход через сечение фильтрации Q_{BO3} ($\text{м}^3/\text{с}$):

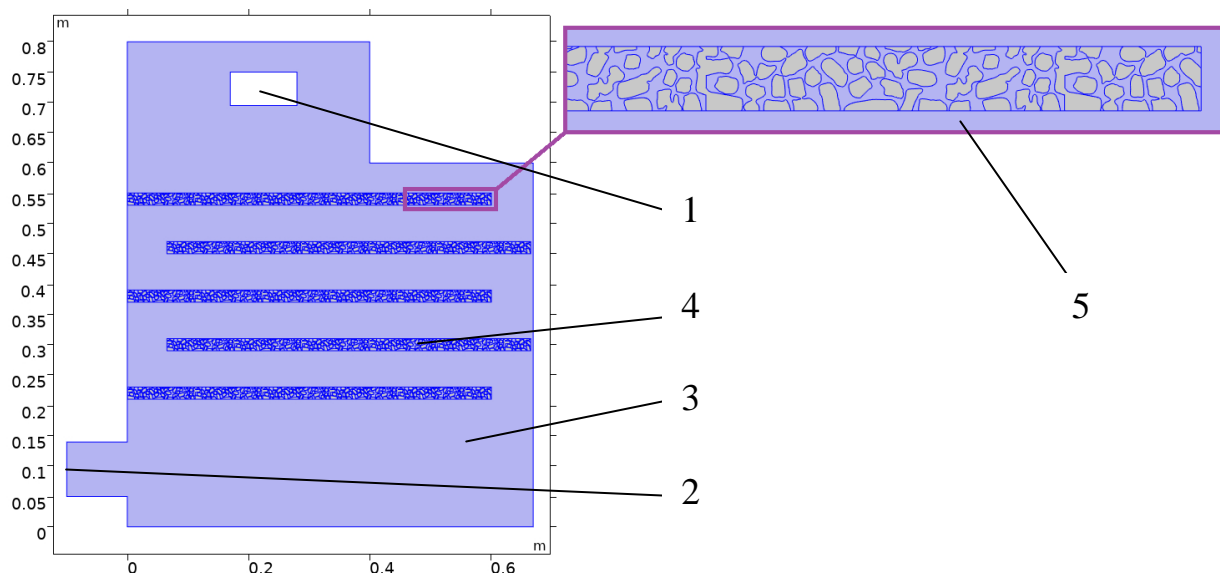
$$u_{\phi} = \frac{Q_{BO3}}{F}, \quad (2.47)$$

где F - площадь сечения фильтрации, м^2 .

Или скорость фильтрации u_{ϕ} можно определить, зная среднюю скорость потока u_{CP} (м/с) и пористость ε :

$$u_{\phi} = u_{CP} \varepsilon. \quad (2.48)$$

Вычислить коэффициент проницаемости K , имея только растровое изображение в программе Comsol Multiphysics затруднительно, так как для расчёта необходимо знать скорость на входе в пористую среду (чтобы найти u_{CP}), а также геометрия засыпки должна соответствовать реальному размеру лотка (так как K зависит от высоты лотка L и поперечного сечения F). Поэтому на основании имеющегося изображения с помощью специального инструмента Image to Curve в данной программе удалось создать геометрическую модель поперечного сечения установки с профилем перговых гранул в лотках (рис. 2.16).



1 – выходное отверстие, 2 – входное отверстие, 3 – воздушная область сушилки, 4 – лоток с пергой, 5 – профиль лотка с пергой

Рисунок 2.16 – Изображение геометрической модели поперечного сечения установки с профилем перговых гранул в лотках

Синим цветом на рис. 2.16 показана расчётная область, в которой будут решаться уравнения для нахождения полей распределения скоростей и давлений воздуха. Так как скорости воздуха в задаче не меняются с течением времени, то задачу можно решить в стационарной постановке.

Для моделирования потоков воздуха внутри засыпки использовались уравнения Навье-Стокса для сжимаемой жидкости в случае её течения в малых каналах (так называемое «ползучее течение» или течение Стокса):

$$\begin{cases} \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}_{\text{воз}}) = 0 \\ -\nabla p + \nabla \cdot \left(\mu (\nabla \mathbf{u}_{\text{воз}} + (\nabla \mathbf{u}_{\text{воз}})^T) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \mathbf{u}_{\text{воз}}) \mathbf{I} \right) + \rho \mathbf{g} = 0 \end{cases}, \quad (2.49)$$

где ρ - плотность воздуха, кг/м³; μ - коэффициент динамической вязкости воздуха, Па·с; \mathbf{I} - единичный вектор; $\mathbf{F} = \rho \mathbf{g}$ - сила тяжести, Н.

При моделировании были заданы следующие, принятые в гидродинамике, граничные условия.

1) Граничное условие отсутствия скольжения на внешних стенках. На внешних границах геометрической модели (практически на всех границах

синей области показанной на рис. 2.16 за исключением границ, определённых граничными условиями ниже) скорость воздуха была принята равной нулю $u_{\text{воз}} = 0$.

2) Граничное условие на входе. На границе, соответствующей входному отверстию, была задана скорость воздуха:

$$u_{\text{воз}} = -u_0 n, \quad (2.50)$$

где u_0 - скорость, создаваемая вентилятором на входе ($u_0 = 1,6$ м/с), м/с; n - вектор нормали, направленный против движения потока воздуха.

3) Граничное условие на выходе. На границах, образующих выходное отверстие, было задано начальное значение давления равное нулю.

4) Граничное условие отсутствия скольжения на внутренних стенках. Соответствует граничному условию отсутствия скольжения на внешних стенках. Применено к границам, расположенным слева и справа лотков с пергой, что обусловлено конструкцией самих лотков (а именно наличием металлических бортов).

5) При моделировании учитывалось влияние гравитации ρg в (2.45).

Перга в лотках лежит в рамках на мелкой сетке. В рассматриваемых в данной работе моделях сопротивлением сетки, которое она оказывает потоку воздуха пренебрегаем.

Результаты компьютерной обработки математической модели (представленной уравнением (2.49) и описанными выше граничными условиями) в виде полей распределения скоростей и давлений воздуха внутри установки представлены на рис. 2.17. Из рисунка видно, как основной поток воздуха сосредоточен в зигзагообразном канале сформированным расположением лотков с пергой. Его максимальная скорость достигает 4,18 м/с. В порах образуемых перговыми гранулами, находящимися в пятом лотке скорости воздуха достигают значений 0,31 м/с (рис. 2.18).

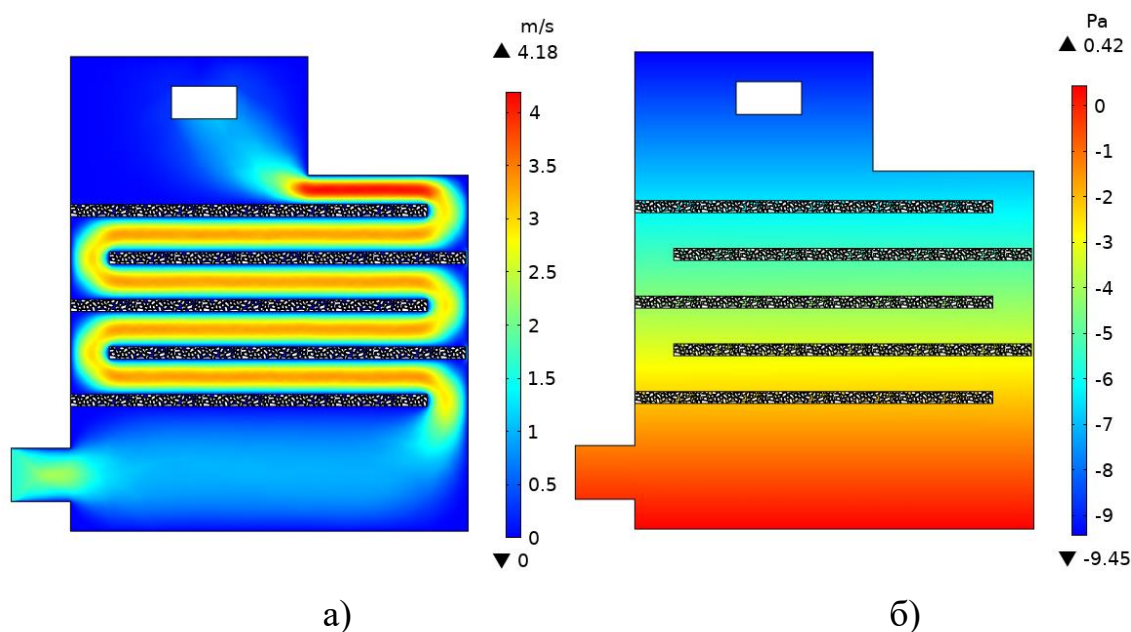


Рисунок 2.17 – Изображение полей скоростей (а) и давлений (б) воздуха в установке

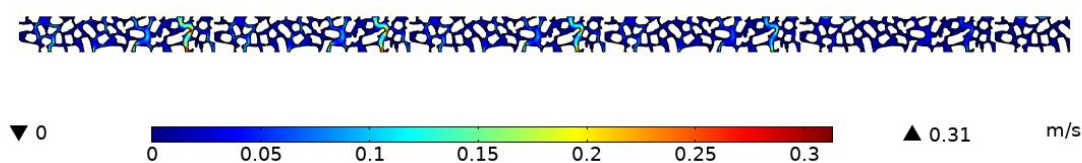


Рисунок 2.18 – Изображение поля скоростей в воздушной области, образуемой перловыми гранулами, находящимися в пятом лотке

В других четырёх лотках максимальные скорости отличаются: в первом – 0,18 м/с, во втором – 0,36 м/с, в третьем – 0,33 м/с, в четвёртом – 0,36 м/с. Как видно разница в скоростях воздуха между первым и последующими лотками свидетельствует о различиях в значениях проницаемости для каждого из лотков. Средние скорости в лотках составили: в первом – $1,3964 \cdot 10^{-2}$ м/с, во втором – $2,3355 \cdot 10^{-2}$ м/с, в третьем – $2,3355 \cdot 10^{-2}$ м/с, в четвёртом – $2,4172 \cdot 10^{-2}$ м/с, в пятом – $2,5391 \cdot 10^{-2}$ м/с.

Значения давлений вблизи верхней границы пятого лотка отличаются не сильно: от 6,505 до 6,435 Па (рис. 2.19 слева). То же самое касается и давлений вблизи нижней границы пятого лотка: от 6,11 до 6,19 Па (рис. 2.19 справа). Примерно такая же картина и в других лотках (см. приложение 2).

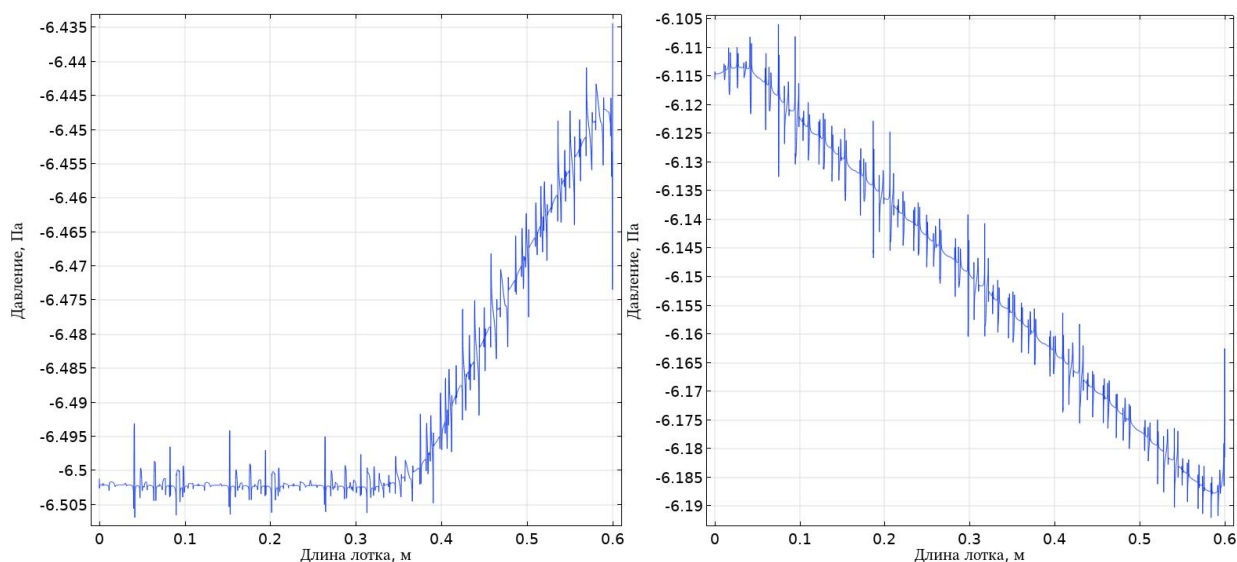


Рисунок 2.19 – Графики изменения давлений вдоль верхней (слева) и нижней (справа) границ пятого лотка

Найдя все необходимые значения в результате моделирования, можно рассчитать проницаемость для каждого лотка с пергой. Согласно формуле (2.46) получены следующие значения проницаемости K : для первого лотка – $6,1185 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$, для второго – $9,2694 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$, для третьего – $9,0196 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$, для четвертого – $9,2758 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$, для пятого – $9,5385 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$.

Таким образом, получена методика определения пористости и проницаемости пористого материала, заключающаяся в следующем.

1. Сканирование профиля исследуемого материала и получение монохромного изображения, где одним цветом будет раскрашен исследуемый материал, а другим цветом поры данного материала.

2. Подсчёт площади, занятой цветом, который соответствует порам и расчёт пористости, как соотношения найденной площади к площади всего изображения.

3. На основе полученного изображения разработать геометрическую модель, соответствующую сечению установки с профилем пористого материала, высушиваемого в нём.

4. Определить уравнения гидродинамики, а также начальные и граничные условия, которые наиболее соответствуют рассматриваемой задаче.

5. По результатам обработки математической модели в специализированной для этого компьютерной программ (Comsol Multiphysics, ANSYS и др.) определить проницаемость по известной формуле.

Стоит отметить, что данная методика имеет свою погрешность, связанную с правильным определением границ пористого тела на отсканированном изображении, а также с его переносом в Comsol Multiphysics при котором форма пористого тела может незначительно изменяться. Таким образом, полученные значения можно рассматривать, как приближённые и в случаи плохой сходимости модели могут быть уменьшены на порядок и более.

Полученные системы уравнений (2.25), (2.26) и (2.45) описывающие транспорт влаги и тепловые процессы в сушильной камере можно решить, используя специальные программные средства. Как и ранее воспользуемся для этого программным продуктом Comsol Multiphysics. Так как сушильная камера имеет плоскость симметрии, то на соответствующей плоскости было задано условие Symmetry. В интерфейсе программы были заданы следующие начальные параметры модели: начальная температура воздуха и перги T , скорость воздуха на входе в сушильную камеру $u_{\text{ВОЗ_ВХ}}$, относительная влажность окружающего воздуха ϕ , относительная влажность воздуха для расчёта начального влагосодержания в перге (равна ϕ), доля влаги связанной с пергой $s_{\text{СК}}$, пористость перги ε , проницаемость перги K для каждого из лотков, теплопроводность перги $k_{\text{ПГ}}$, теплоёмкость перги $C_{\text{ПГ}}$, плотность перги $\rho_{\text{ПГ}}$. Также была задана найденная функция равновесного влагосодержания w от относительной влажности окружающего воздуха ϕ . Принятые начальные значения параметров модели показаны в табл. 2.2.

Таблица 2.2 – Значения принятых начальных параметров модели

Начальная температура воздуха и перги T , °С	22,6
Скорость воздуха на входе в сушильную камеру $u_{\text{ВОЗ_ВХ}}$, м/с	1,6
Относительная влажность окружающего воздуха ϕ , %	35
Начальная влажность гранул пчелиной перги, %	27
Доля влаги, связанной с пергой $s_{\text{СК}}$, %	10
Пористость перги ε , отн. ед.	0,35
Теплопроводность перги $k_{\text{ПГ}}$, Вт/м·°С	0,24
Теплоёмкость перги $C_{\text{ПГ}}$, Дж/(кг·°С)	1900
Плотность перги $\rho_{\text{ПГ}}$, кг/м ³	1250
Тепловая мощность электрокалорифера, Вт	310
Тепловая мощность ИК-нагревателя, Вт	20
Временной шаг расчёта, ч	0,1

Далее были выбраны физические интерфейсы, подходящие для обработки полученной модели. Для описания тепловых процессов в сушильной камере использовался интерфейс Heat Transfer in Moist Air. В нём были заданы граничные условия, определяющие конвективный тепловой поток от внешних стенок сушильной камеры наружу:

$$q_{cm} = h(T_{ext} - T), \quad (2.51)$$

где T_{ext} - температура наружного воздуха, К; h – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°С).

Так на самой верхней горизонтальной поверхности корпуса коэффициент теплоотдачи:

$$h = \begin{cases} \frac{k}{L} 0,54 Ra_L^{1/4} & \text{если } T > T_{ext} \text{ и } 10^4 \leq Ra_L \leq 10^7 \\ \frac{k}{L} 0,15 Ra_L^{1/3} & \text{если } T > T_{ext} \text{ и } 10^7 \leq Ra_L \leq 10^{11}, \\ \frac{k}{L} 0,27 Ra_L^{1/4} & \text{если } T \leq T_{ext} \text{ и } 10^5 \leq Ra_L \leq 10^{10} \end{cases}, \quad (2.52)$$

где T_{ext} - температура наружного воздуха, К; k - теплопроводность материала стенки, Вт/(м·°С); L - характерная длина плоскости, на которой задаётся граничное условие, м; Ra_L - число Рэлея.

$$Ra_L = \frac{g \alpha_p \rho^2 C_p |T - T_{ext}| L^3}{k \mu}, \quad (2.53)$$

где g - ускорение свободного падения, м/с^2 ; α_p - коэффициент теплового расширения воздуха, $1/\text{К}$; ρ - плотность материала стенки, кг/м^3 ; C_p - удельная теплоёмкость, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

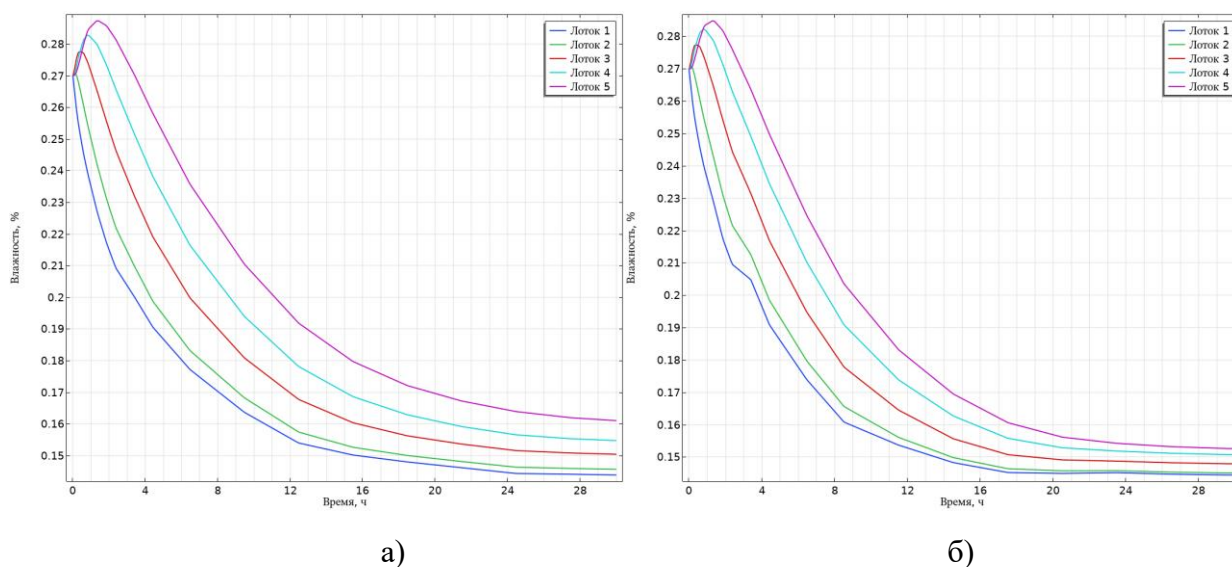
На вертикальных стенках корпуса установки коэффициент теплоотдачи находился следующим образом:

$$h = \begin{cases} \frac{k}{L} \left(0,68 + \frac{0,67 Ra_L^{1/4}}{\left(1 + \left(\frac{0,492k}{\mu C_p} \right)^{9/16} \right)^{4/9}} \right) & \text{если } Ra_L \leq 10^9 \\ \frac{k}{L} \left(0,825 + \frac{0,387 Ra_L^{1/6}}{\left(1 + \left(\frac{0,492k}{\mu C_p} \right)^{9/16} \right)^{8/27}} \right) & \text{если } Ra_L > 10^9 \end{cases} \quad (2.54)$$

Так как предполагается, что установка стоит на опорах, то на нижней горизонтальной поверхности её корпуса будет задано точно такое же граничное условие, как и для верхней горизонтальной поверхности (2.52), но с обратным знаком в вариантах его применения. Также в интерфейсе Heat Transfer in Moist Air были заданы начальные значения температуры воздуха и перги внутри установки и мощности плоскостей, отвечающих за нагреватели. Описание процессов влагопереноса проводилось в интерфейсе Moisture Transport in Air. В нём были заданы параметры влажного воздуха в воздушной области сушильной камеры, параметры перги, функция, описывающая изотерму сорбции влаги. Описание гидродинамических процессов проводилось с помощью интерфейса Turbulent Flow с применением описанной выше модели Algebraic μ Plus. Описание процессов инфракрасного излучения было осуществлено в интерфейсе Radiation in

Participating Media. В котором были заданы коэффициенты поглощения и рассеяния, а также излучательная способность участвующих в моделировании материалов. В ходе исследования выяснилось, что эффект непосредственно от самого ИК-излучения при температуре ИК-нагревателя 39-41°C и мощности 20 Вт незначителен. Основное действие, улучшающее равномерность и скорость сушки ИК-нагреватель оказывает за счёт нагрева своей поверхностью сушильного агента,двигающегося по зигзагообразному каналу.

Итогом расчёта стали поля распределений температуры, влажности, скоростей воздуха и давлений внутри сушильной камеры. Были рассмотрены варианты конвективного и комбинированного нагревов. На рис. 2.20 показано сравнение обоих вариантов в виде графиков изменения среднего значения влажности гранулированной перги в каждом из лотков в течении технологического процесса сушки.



а) при конвективном способе, б) при комбинированном способе

Рисунок 2.20 – Графики изменения среднего значения влажности перги в каждом из лотков с продуктом в течении процесса сушки

Как видно из рис. 2.20 спустя 30 часов конвективной сушки влажность в верхнем и нижнем лотках составляет 16,1% и 14,4% соответственно, в то время как при комбинированном нагреве эти значения через 30 часов

составляют 15,3% и 14,4%, что говорит об увеличении равномерности процесса сушки почти в 2 раза. Использование ИК-нагревателя совместно с конвективным способом нагрева также ускоряет процесс сушки в сравнении с конвекционным способом. По прошествии 16 часов влажность перги при использовании только конвективного нагрева в верхнем лотке переходит порог 18% установленный ГОСТ 31776-2012 в то время как при комбинированном способе сушки в этот момент влажность в том же лотке составляет 16,5%, а порог в 18% был пройден на 12 часу сушки, что на 4 часа раньше. Такой эффект достигается за счёт дополнительного прогрева сушильного агента поверхностью ИК-нагревателя. Что хорошо согласуется с идеей о повышении тепловой мощности нагревателя электрокалорифера в первые часы сушки, которая была исследована в начале данной главы. Только в данном случае речь идет не о повышении тепловой мощности на входе в сушильную камеру и как следствие перегреве продукта, а о дополнительном поддерживающем подогреве сушильного агента при его протекании по зигзагообразному каналу за счёт подвода небольшой тепловой мощности, передаваемой через поверхность ИК-нагревателя. Наличие системы рекуперации наравне с ИК-нагревателем также является ещё одним фактором, увеличивающим равномерность распределения влаги между лотками.

На рис. 2.20 при комбинированном нагреве на графике, показывающем среднее значение влажности пчелиной перги в самом нижнем лотке (лоток 1) виден небольшой всплеск на 3 часе сушки, что обосновывается более интенсивным испарением влаги за счёт добавления дополнительного нагревателя и её подачей через систему рекуперации в нижнюю часть сушильной камеры. Такие же всплески можно наблюдать на графиках изменения влажности воздуха в точке Н0 на рис. 2.21 при конвективном и комбинированном способах нагрева. Во втором случае наблюдаемый всплеск сильнее.

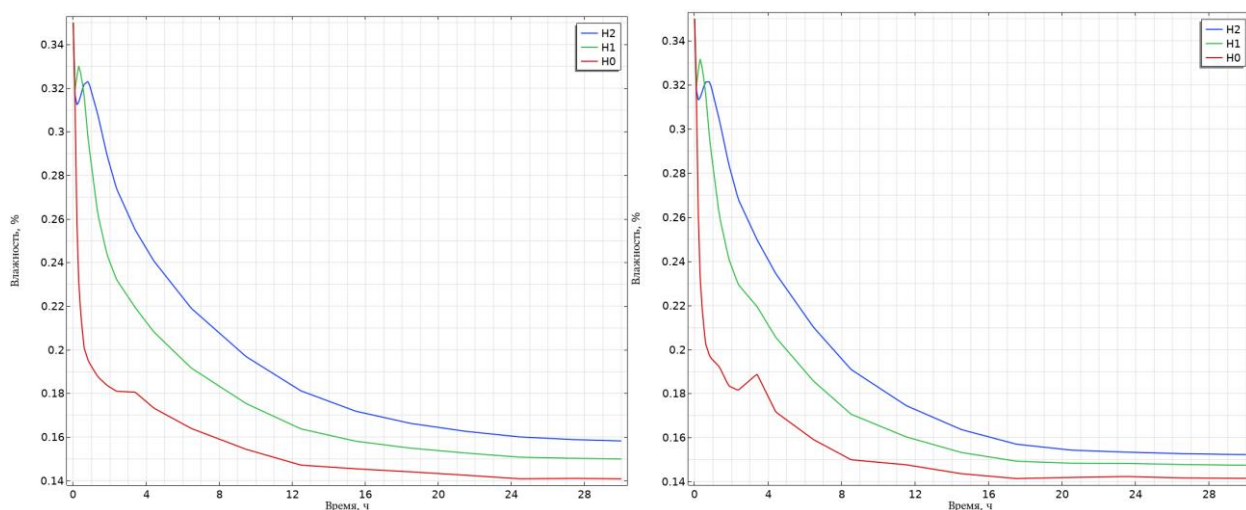


Рисунок 2.21 – Графики изменения влажности воздуха в точках Н0, Н1 и Н2 сушильной камеры согласно рис. 2.11 при конвективном (слева) и комбинированном (справа) способах

Результаты моделирования показали, что при конвективном способе в конструкции сушильной камеры есть существенный недостаток. Над поверхностью верхнего лотка создаётся область, в которой застаивается влага и наблюдаются одни из самых низких значений температур. Это хорошо видно на рис. 2.22.

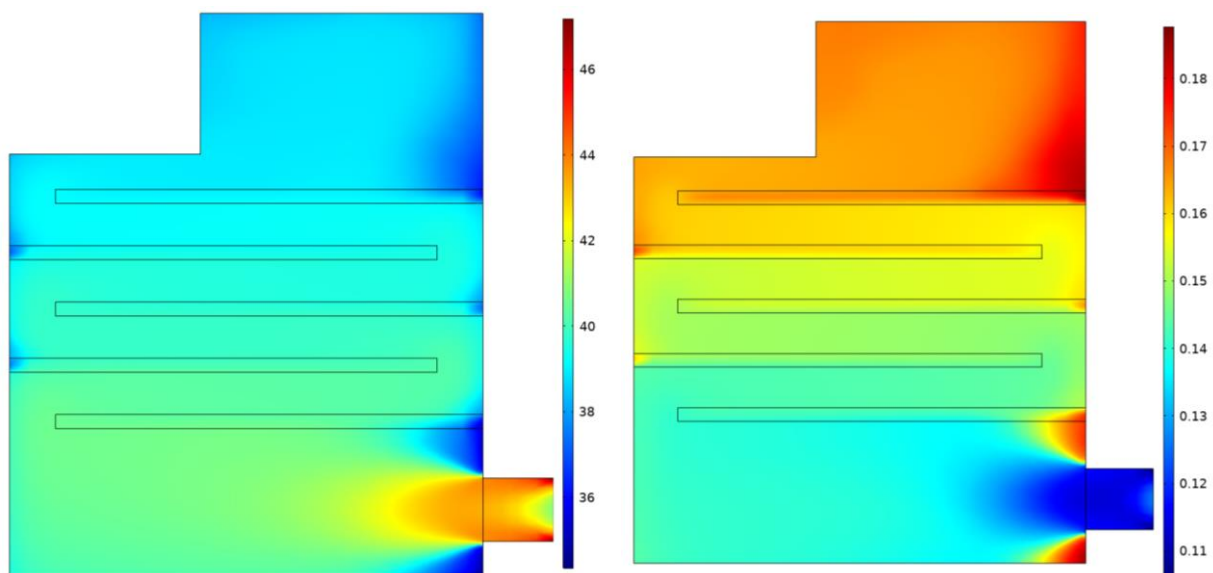


Рисунок 2.22 – Изображение полей распределения температуры (слева в °С) и влажности (справа в отн. ед.) внутри сушильной установки при конвективном нагреве через 20 часов работы

Добавление ИК-нагревателя решает эту проблему создавая более равномерный градиент влажности и температур внутри установки (рис. 2.23).

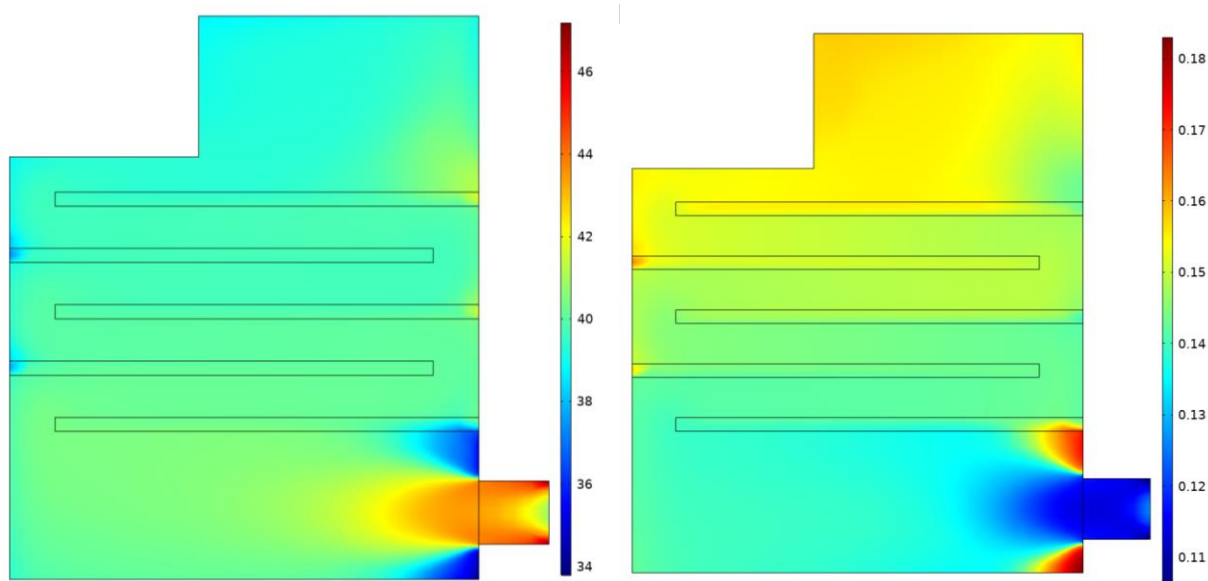


Рисунок 2.23 – Изображение полей распределения температуры (слева в °С) и влажности (справа в отн. ед.) внутри сушильной установки при комбинированном нагреве через 20 часов работы

Полученные модели тепло- и влагопереноса позволяют подобрать рациональную мощность нагревательных элементов. Зачастую в сушилках устанавливаются нагреватели мощность которых намного превышает ту мощность, которая необходима для нагрева воздуха до 40 °С. Такой выбор отрицательно сказывается на работе коммутационной аппаратуры снижая её срок службы в результате частых переключений. Основным критерием при выборе мощности нагревателей была температура перги, которая не должна превышать 40-41 °С. Для рассматриваемой сушильной камеры рациональные мощности нагревателя электрокалорифера и ИК-нагревателя составили 310 и 20 Вт соответственно. При таких значениях мощности нагревателей перга в лотках не подвергалась отрицательному воздействию высоких температур. Размеры ИК-нагревателя в геометрической модели соответствуют стандартному плёночному нагревателю с шириной рулона 0,5 м.

При сушке продуктов каждый раз температура наружного воздуха, его влажность могут отличаться, что неминуемо ведёт к различиям в процессах, возникающих внутри сушильной камеры. Так, например, хорошо известно, что разность между температурой наружного воздуха и температурой внутри сушильной камеры может существенным образом влиять на время сушки пчелиной перги. Известны случаи, когда пчеловоды пересушивали пергу из-за того, что сушка проводилась при большей разности температур, чем до этого. Разработанные модели тепло- и влагопереноса позволяют обосновать время сушки пчелиной перги в зависимости от параметров наружного воздуха, конструкции сушильной камеры, физических свойств продукта. Согласно геометрической модели лотков с размерами $0,6 \times 0,6 \times 0,02$ м, значения плотности перги принятой равной $\rho_{\text{пч}} = 1250 \text{ кг/м}^3$ и пористости слоя перговых гранул $\varepsilon = 0,35$ принимаем, что в рассматриваемой сушильной камере за 1 раз обрабатывается до 30 кг пчелиной перги. При начальных условиях указанных в табл. 2.2 время сушки до влажности пчелиной перги в диапазоне 14,4% – 16,1% (в зависимости от расположения лотка) составляет при конвективном режиме работы 30 часов (при этом удельные энергозатраты составляют $0,310 \text{ кВт} \cdot \text{ч/кг}$), при комбинированном режиме до примерно той же влажности время сушки составляет 18 часов ($0,198 \text{ кВт} \cdot \text{ч/кг}$). Таким образом, при комбинированном нагреве в данном случае время сушки уменьшается в 1,7 раза, а удельные затраты электрической энергии в 1,5 раза.

Работа сушильной камеры включает в себя два постоянно протекающих процесса: удаление отработанного агента сушки из установки, а также его частичная рекуперация. Режимным параметром этих процессов является расход сушильного агента через выходные отверстия сушильной камеры и его подача системой рекуперации к нижним лоткам. Определено, что наиболее эффективным режимом работы сушильной установки является режим при расходе отводимого наружу сушильного агента $46,6 \text{ м}^3/\text{ч}$, и при подачи его системой рекуперации $12 \text{ м}^3/\text{ч}$. Представленные до этого

результаты моделирования были сделаны при этих значениях. Эффективное значение расхода сушильного агента достигается при скорости вентилятора электрокалорифера равной 1,6 м/с. На рис. 2.24 и 2.25 приведены результаты моделирования конвективного способа сушки при разной скорости воздуха во входном сечении сушильной установки и при одинаковой его подаче системой рекуперации – 12 м³/ч.

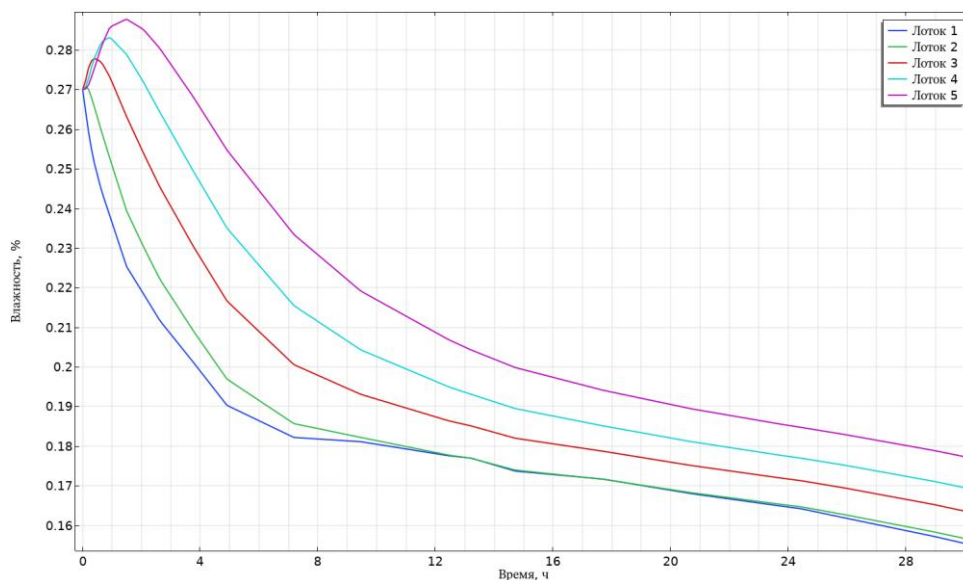


Рисунок 2.24 – Графики изменения среднего значения влажности пчелиной перги в каждом лотке при скорости воздуха на входе в установку 1,5 м/с

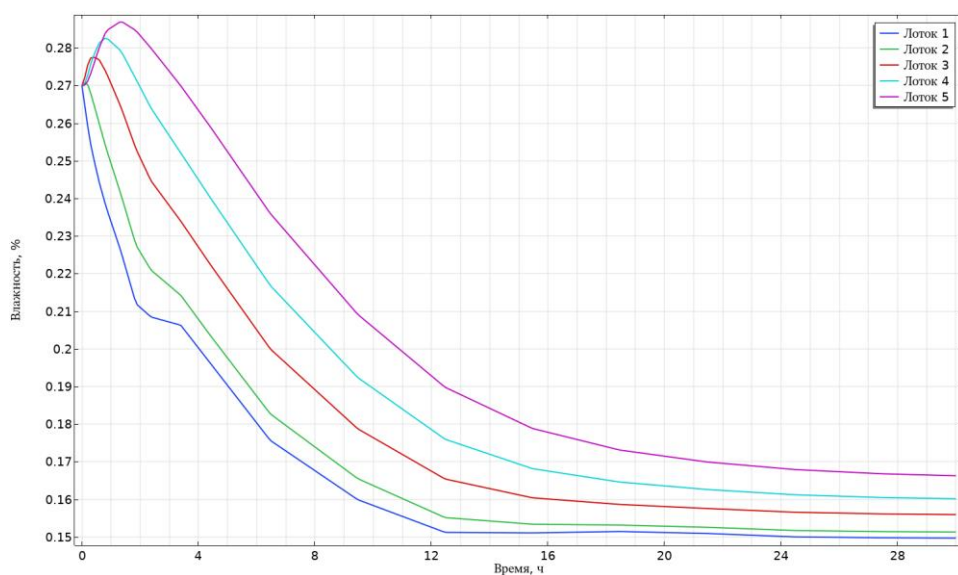


Рисунок 2.25 – Графики изменения среднего значения влажности пчелиной перги в каждом лотке при скорости воздуха на входе в установку 1,7 м/с

При скорости агента сушки на входе в установку равной 1,5 м/с через 30 часов значения влажности составляют от 15,5% до 17,7%, что выше, чем при скорости 1,6 м/с и при этом снижается равномерность сушки. Причём из рис. 2.24 видно, что по истечении 30 часов процесс сушки ещё не установился. При скорости 1,7 м/с к 30 часу процесса сушки пчелиная перга достигает значений влажности от 15% до 16,7, что по равномерности сушки совпадает с результатом при скорости 1,6 м/с, но при этом сами значения влажности на 0,6% выше. Такие же зависимости влажности продукта от расхода агента сушки наблюдаются и при комбинированном способе нагрева.

На рис. 2.26 и 2.27 показаны результаты моделирования конвективного режима при одинаковом расходе воздуха – 46,6 м³/ч, но при его разной подаче системой рекуперации.

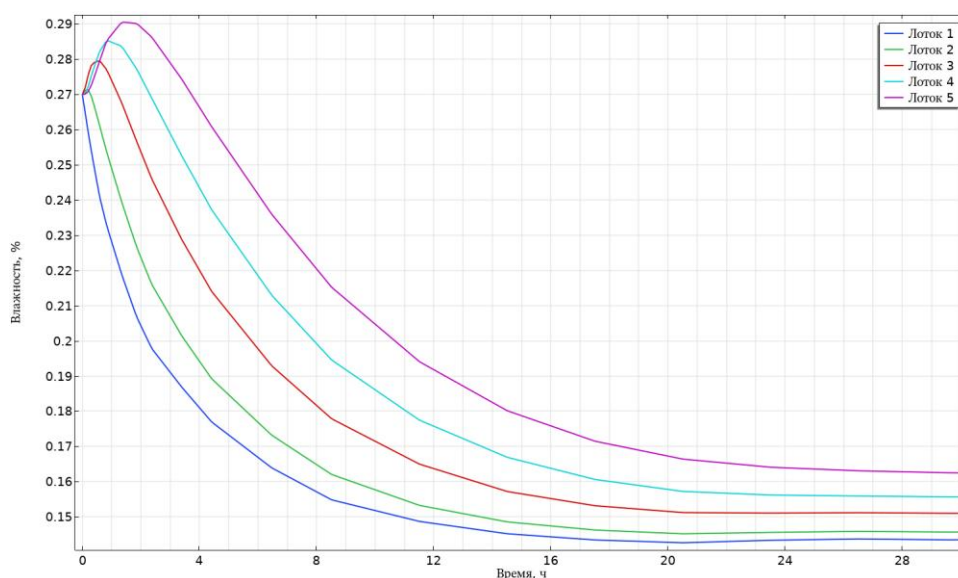


Рисунок 2.26 - Графики изменения среднего значения влажности пчелиной перги в каждом лотке при подаче агента сушки системой рекуперации равной 5 м³/ч

Результаты при подаче 5 м³/ч к совпадают с результатами представленными на рис. 2.20а, но влажность продукта в лотках при такой подаче на 0,1-0,2% выше (рис. 2.26). При подаче больше 12 м³/ч влажность продукта в верхних лотках не опускается ниже 18% (рис. 2.27).

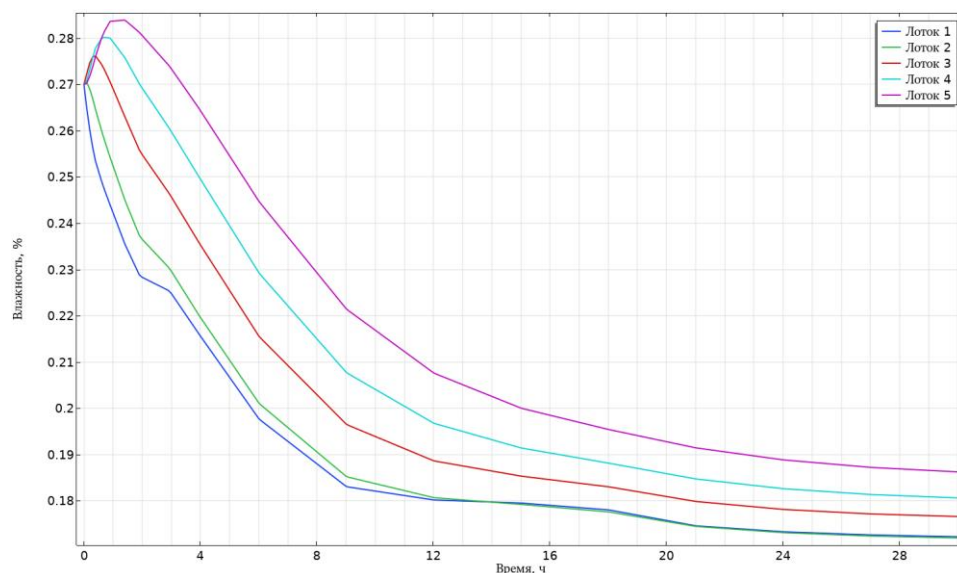
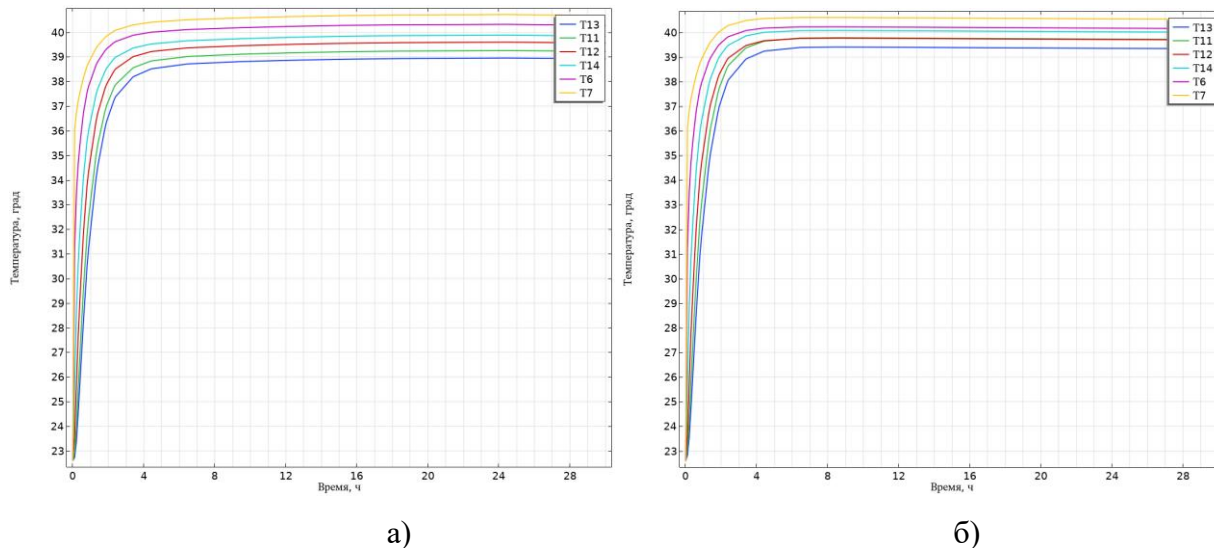


Рисунок 2.27 - Графики изменения среднего значения влажности пчелиной перги в каждом лотке при подаче агента сушки системой рекуперации равной $22,2 \text{ м}^3/\text{ч}$

Также были получены графики изменения температур в точках показанных на рис. 2.11 (рис. 2.28).



а) конвективный способ, б) комбинированный способ

Рисунок 2.28 – Графики изменения температуры во время сушки в точках показанных на рис. 2.11

Как и следовало предположить рост температур между верхними лотками при комбинированном способе происходит быстрее, чем при

конвективном. Так, например, на 2 часу сушки при конвективном способе в точке T13 – 36,5°C, а при комбинированном – 37°C.

2.3 Выводы по главе

1. На основе компьютерного моделирования в ПО Comsol Multiphysics определены способы интенсификации удаления влаги из продукта и получения равномерности сушки по всему объёму сушильной камеры: установка зигзагообразного канала, формируемого лотками с пергой; добавление в камеру системы рекуперации сушильного агента; использование ИК-нагревателя для уменьшения градиента температур во всём объёме камеры.

2. Разработаны математические модели процессов тепло- и влагопереноса внутри сушильной установки, которые реализованы в программном обеспечении Comsol Multiphysics. Анализ полученных результатов в виде полей распределения температур, влажностей, давлений и скоростей воздуха показал следующее: комбинация конвективного и ИК-нагрева позволяет сократить время сушки пчелиной перги в 1,7 раза, уменьшилась разность значений относительной влажности гранул пчелиной перги между нижним и верхним лотками в 2 раза, затраты потребляемой электроэнергии уменьшились в 1,5 раза.

3. Получена геометрическая модель установки для сушки гранул пчелиной перги, которая является составной частью мультифизических моделей, содержит 10 доменов, а её расчётная сетка состоит из 164 тыс. элементов.

4. Получена методика определения характеристик пористых продуктов позволяющая получить основные параметры слоя гранул пчелиной перги – пористость 0,35, проницаемость от $6,1185 \cdot 10^{-9}$ м² в нижнем лотке до $9,5385 \cdot 10^{-9}$ м² в верхнем. Определена изотерма сорбции влаги пергой при

температуре окружающего воздуха 23°C. График полученной зависимости может быть достаточно точно описан полиномом третьей степени.

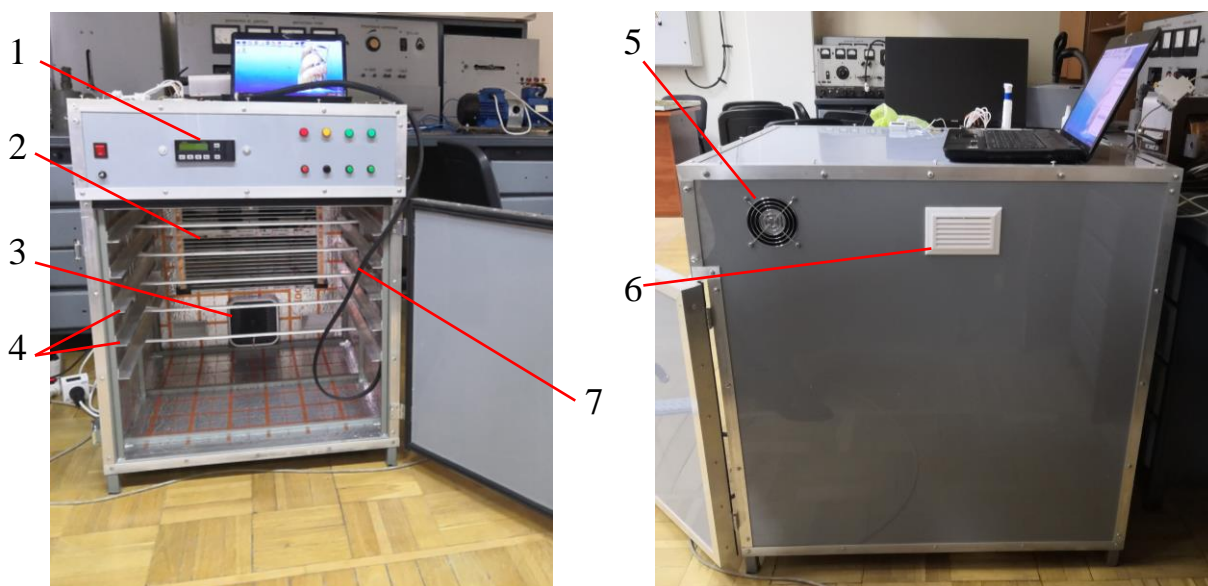
5. Комбинация конвективного и ИК-нагрева позволяет сократить время сушки пчелиной перги в 1,7 раза по сравнению с конвективным режимом. Установка ИК-излучателя и системы рекуперации позволила уменьшить разность относительной влажности гранул пчелиной перги между нижним и верхним лотками в 2 раза, и уменьшить затраты энергии в 1,5 раза.

6. Установлены эффективные режимы работы сушильной установки объёмом 0,3 м³, максимальной загрузкой 30 кг продукта располагаемого в 5 лотках: система вентиляции воздуха должна обеспечивать отвод наружу теплоносителя с производительностью 46 м³/ч, а система рекуперации должна обеспечить подачу агента сушки к нижним лоткам с производительностью 12 м³/ч. Рациональными параметрами комбинированного нагрева являются: мощность калориферной установки – 310 Вт при скорости входного воздуха 1,6 м/с, мощность ИК-нагревателя – 20 Вт с площадью излучаемой поверхности 0,175 м².

3. МЕТОДИКА, РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СУШИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ПЧЕЛИНОЙ ПЕРГИ КОМБИНИРОВАННЫМ НАГРЕВОМ И РАСЧЕТ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЕЁ ВНЕДРЕНИЯ

3.1 Методика проведения экспериментальных исследований по подтверждению теоретических положений сушки гранулированной пчелиной перги комбинированным нагревом

Для проведения экспериментальных исследований с целью подтверждения эффективности комбинированного нагрева на кафедре электрических машин и электропривода Кубанского ГАУ была разработана сушильная установка фотографии которой приведены на рис. 3.1.



а)

б)

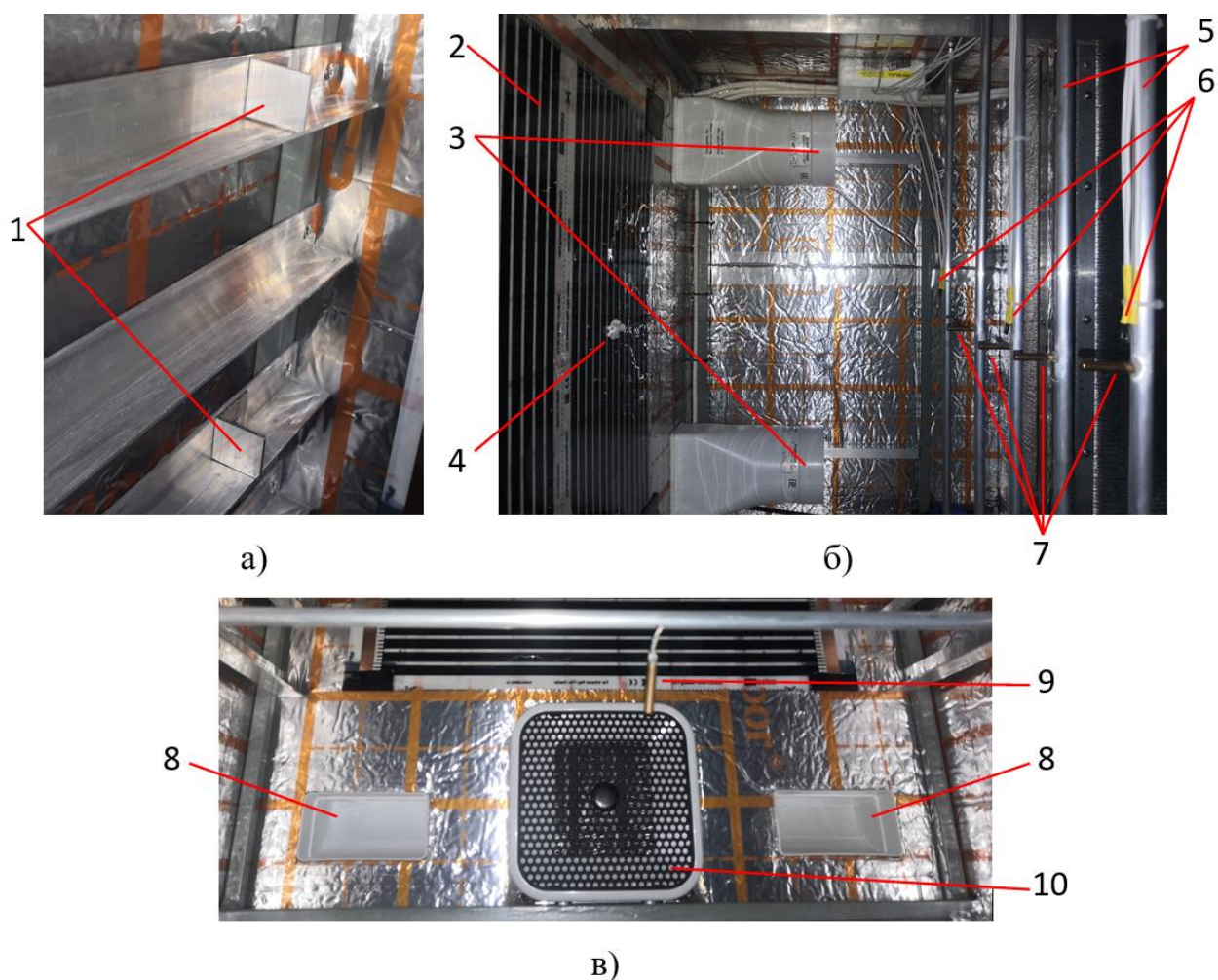
а) вид спереди, б) вид сбоку

1 – программируемое реле ОВЕН ПР200, 2 – ИК-нагреватель, 3 – электрокалорифер, 4 – опоры для лотков, 5 – вентилятор охлаждения системы автоматизированного управления, 6 – отверстие для выхода отработанного агента сушки, 7 – кабель для подключения датчиков расположенных в одном из лотков

Рисунок 3.1 – Фотографии сушильной установки разработанной в Кубанском ГАУ

Данная сушильная установка полностью воспроизводит геометрическую модель сушилки представленную на рис. 2.10 в предыдущей

главе. Для расположения лотков с продуктом зигзагообразно на соответствующих опорах для лотков установлены ограничители. Система рекуперации представлена двумя стандартными вентиляционными каналами сечением 11х5,5 см и двумя канальными вентиляторами расположенными на входе в вентиляционные каналы сверху системы рекуперации сушильного агента. Для измерения температуры и влажности воздуха между опорами для лотков и перпендикулярно им были установлены трубки с проложенными в них проводниками от датчиков (рис. 3.2).



а) вид опор для лотков с расположенными через на них ограничителями, б) фотография, сделанная снизу сушильной камеры, в) низ сушильной камеры
 1 – ограничители для лотков, 2 – ИК-нагреватель, 3 – вентиляторы системы рекуперации сушильного агента, 4 – датчик температуры установленный на поверхности ИК-нагревателя, 5 – трубки для размещения датчиков температуры между лотками, 6 – датчики влажности располагаемые в соответствии с рис. 2.11, 7 – датчики температуры располагаемые между лотками согласно рис. 2.11, 8 – выходное отверстие системы рекуперации, 9 – датчик управления работой электрокалорифера, 10 - электрокалорифер
 Рисунок 3.2 – Фотографии, поясняющие внутреннее устройство сушильной

камеры

Сами датчики температуры и влажности расположены в точках соответствующих точкам в рассмотренной ранее геометрической модели и указанных на рис. 2.11. Помимо этих 6 датчиков в установке также был расположен 1 датчик температуры на поверхности ИК-нагревателя для контроля и регулирования его температуры во время сушки, а также 5 датчиков температуры в одном из лотков для измерения температуры слоя пчелиной перги (рис. 3.3).



1 – датчики температуры, 2 – разъём для подключения датчиков температуры к программируемому реле ПР200 через кабель показанный на рис. 3.1

Рисунок 3.3 – Фотография лотка с расположенными в нём датчиками температуры

Все датчики температуры представляют собой термосопротивление с характеристикой 50М. В качестве датчиков влажности использовалось 3 аналоговых датчика влажности НН 4000 (рис. 3.4).



Рисунок 3.4 – Изображение используемых датчиков температуры (слева) и влажности (справа) воздуха

Датчики влажности были подключены к микроконтроллерной платформе Arduino Nano подключённой к ноутбуку для передачи информации о значениях влажности на его экран. Программа используемая для этого написана на языке C++ и показана в приложении 3. Сушильная камера теплоизолирована с помощью армофола и пеноплекса.

Система автоматизированного управления сушилкой построена на базе программируемого реле ПР200 отечественной фирмы ОВЕН. Принципиальная электрическая схема управления сушильной установкой представлена на рис. 3.5.

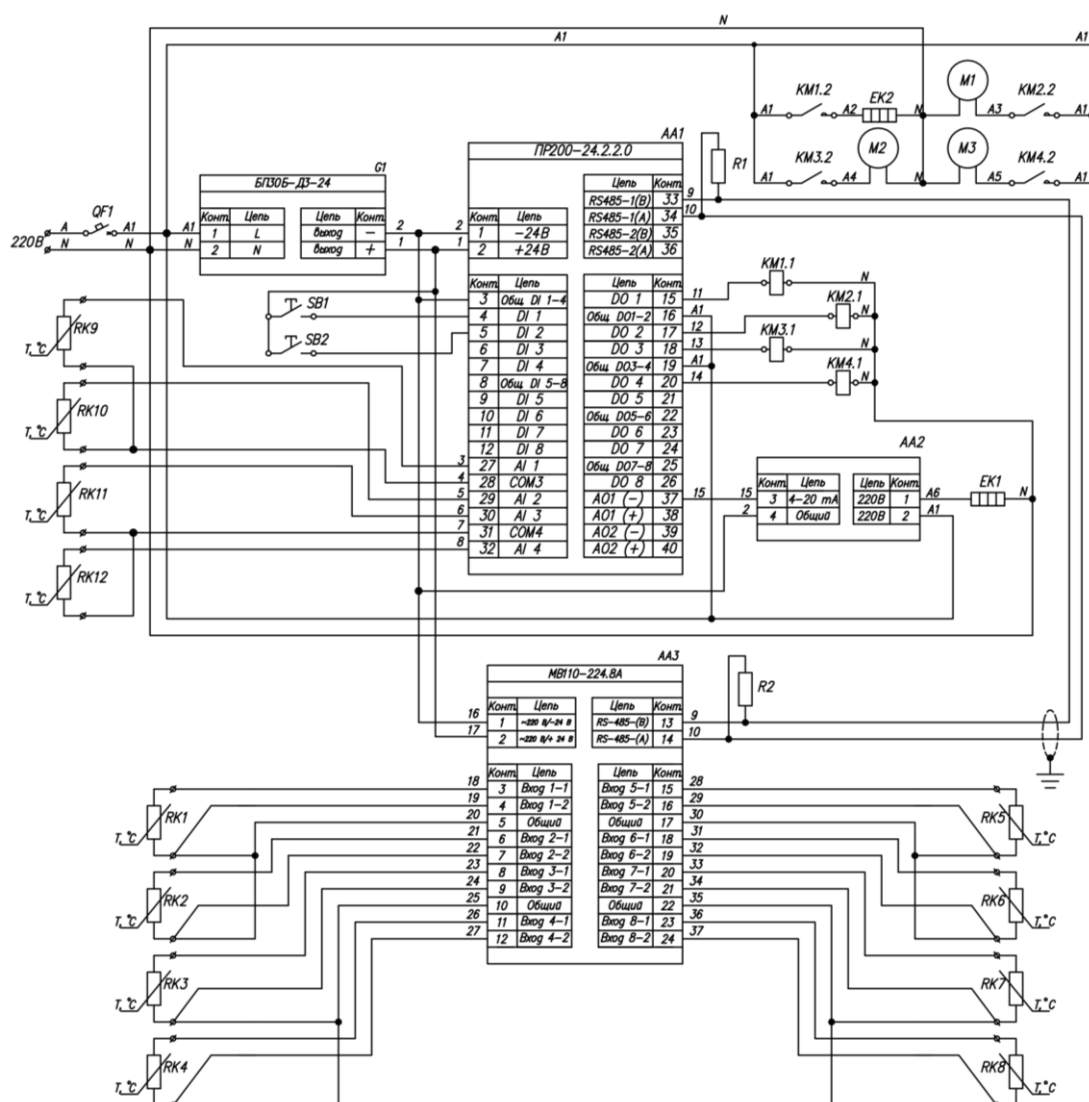


Рисунок 3.5 – Принципиальная электрическая схема автоматизированного управления лабораторной сушильной установкой с комбинированным нагревом

Питание схемы осуществляется от сети 220 В через автоматический выключатель QF1. Программируемое реле ПР200 имеет питание 24 В получаемое им от блока питания БП30Б. Так как ПР200 имеет всего 4 аналоговых входа AI1-AI4 для подключения термосопротивлений R9-R12, то для подключения остальных 8 термосопротивлений R1-R8 установленных в сушильной установке был использован модуль расширения аналоговых входов MB110. Данный модуль связан с программируемым реле с помощью интерфейса RS-485. Для исключения помех при передаче данных через этот интерфейс на обоих концах линии, связывающей модуль и реле установлены резисторы R1 и R2. Для запуска и остановки процесса сушки в схеме предусмотрены 2 кнопки SB1 и SB2, которые подключены к первым двум дискретным входам программируемого реле DI1-DI2. С помощью них осуществляется управление исполнительными устройствами: двумя вентиляторами системы рекуперации M1 и M2, вентилятором электрокалорифера M3, нагревателем электрокалорифера EK1 и ИК-нагревателем EK2. Все перечисленные устройства подключены к дискретным выходам DO1-DO4 программируемого реле через промежуточные реле KM1-KM4 за исключением нагревателя электрокалорифера EK1, который подключён к аналоговому выходу AO1 программируемого реле ПР200 через твердотельное реле AA2 с целью изменения мощности данного нагревателя, которая по паспортным данным составляет 1,5 кВт.

В программируемое реле ПР200 загружается заранее написанная программа управления в соответствие с алгоритмом представленным на рис. 3.6. Разработанный алгоритм предполагает наличие двух переменных T1 и T2. Это переменные, в которые записываются показания двух датчиков температуры, по которым происходит управления нагревателем электрокалорифера и ИК-нагревателем. Датчик для второго расположен на самой поверхности ИК-нагревателя (рис. 3.2 б), в то время как датчик для управления нагревателем электрокалорифера находится под нижним лотком закреплённый на трубе (рис. 3.2 в).

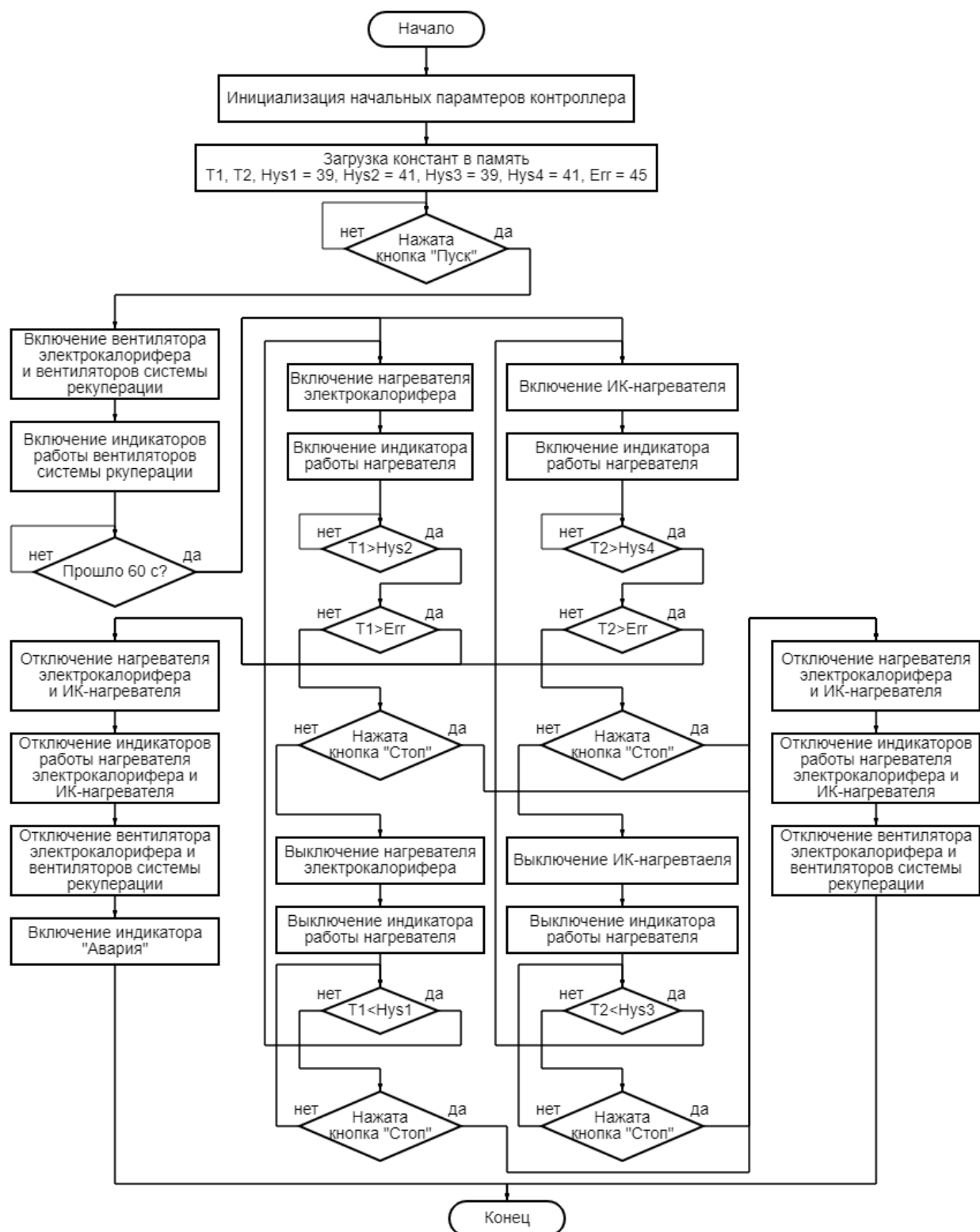


Рисунок 3.6 – Алгоритм управления сушильной камерой

Помимо этих переменных в начальный момент времени после запуска системы управления инициализируются константы Hys1, Hys2 (для нагревателя электрокалорифера) и Hys3, Hys4 (для ИК-нагревателя),

отвечающие за работу обоих нагревателей по двухпозиционному закону регулирования, предусматривающего наличие так называемого гистерезиса – диапазона регулируемой величины состоящего из нижнего и верхнего пределов при достижении которых отключается или включается управляемое оборудование в зависимости от логики его работы. В данном случае для каждого из нагревателей установлены одинаковые диапазоны от 39°C до 41°C чтобы поддерживать внутри сушильной камеры среднюю температуру равную 40°C. Также среди прочих констант присутствует константа Eгг равная 45°C, что соответствует возникновению аварийной ситуации, при которой необходимо отключить работающее оборудование и подать сигнал об аварии. Запуск механизмов осуществляется с помощью кнопки «Пуск» проверка нажатия, которой осуществляется сразу после инициализации управляющего контроллера и загрузки констант в память. При нажатии на кнопку «Пуск» вначале осуществляется включение на 1 минуту всех 3 вентиляторов для продувки сушильной камеры, после чего включается нагрев и его контроль с помощью соответствующих условий. Во время работы устройств также проверяется условие на нажатие кнопки «Стоп» с помощью которой процесс сушки останавливается.

В разработанной сушильной камере все показания получаемые от датчиков температуры выводились на экран программируемого реле ПР200 (рис. 3.7).



Рисунок 3.7 – Вывод на экран программируемого реле показаний датчиков температуры во время работы сушильной установки

Один из вариантов используемой нами программы для программируемого реле ПР200 показан на рис. 3.8

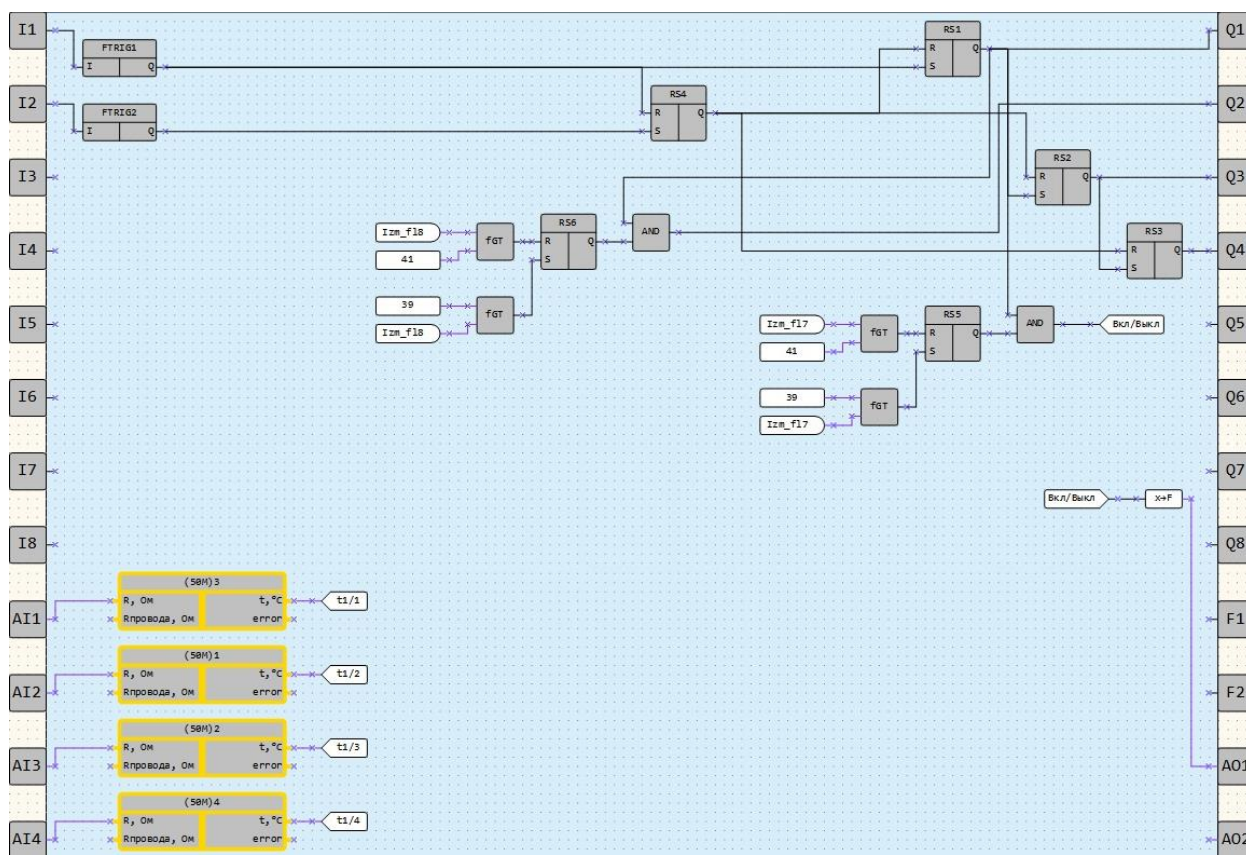


Рисунок 3.8 – Вид программы для программируемого реле ПР200 на языке FBD реализованной в программной среде OwenLogic

Датчики температуры подключённые непосредственно к самому программируемому реле ПР200 в программе подключены к входам AI1-AI4 и их показания преобразуются их значений сопротивления в градусы Цельсия с помощью макросов и сохраняются в переменные с именами t1/1 – t1/4. Значения от остальных датчиков температуры поступают в программируемое реле ПР200, как сетевые переменные по интерфейсу связи RS-485 и в основной программе не указываются, за исключением двух значений от двух датчиков по которым идёт управление нагревателями. Переменные, в которые записываются значения температуры от этих датчиков называются в программе Izm_fl7 (для нагревателя электрокалорифера) и Izm_fl8 (для ИК-

нагревателя). Они участвуют в алгоритме управления данными устройствами с помощью логических элементов сравнения fGT и RS-триггеров.

Измерение и контроль воздушных потоков, создаваемых электрокалорифером и системой рекуперации осуществлялось термоанемометром Testo 405. Скорость, создаваемая вентилятором электрокалорифера на входе в сушильную камеру, соответствовала рациональной скорости, найденной при компьютерной обработке моделей тепло- и влагопереноса – 1,6 м/с.

3.2 Результаты экспериментальных исследований по подтверждению теоретических положений сушки гранулированной пчелиной перги комбинированным нагревом

Исследование комбинированного способа нагрева проводилось при следующих параметрах окружающей среды: температура воздуха в помещении колебалась в диапазоне от 22°C до 26 °C, влажность воздуха 36%. Начальное значение влажности гранул пчелиной перги составило 25%. Сушка длилась 20 часов. Контроль температуры и влажности осуществлялся в точках указанных на рис. 2.11. При завершении процесса сушки определялась влажность перги в каждом лотке.

Результаты в виде графиков изменения температуры в процессе сушки в точках указанных на рис. 2.11 показаны на рис. 3.9 - 3.14. Для наглядности переходного процесса, а также по причине того, что после 5 часа температура внутри сушилки практически не меняется представленные на рис. 3.9 - 3.14 графики показаны в соответствующем временном диапазоне. Сравнение теоретических и экспериментальных данных проводили по следующей методике: для теоретически полученных графиков методом наименьших квадратов были найдены регрессионные уравнения. При этом ставилась цель получить высокий уровень коэффициента детерминации R^2 близкий к 1, а

также уровень средней ошибки аппроксимации A меньше 1%. Для этого при расчёте методом наименьших квадратов была выбрана аппроксимация полиномом 8 степени. Далее полученная регрессионная зависимость сравнивалась с экспериментальной кривой на основе тех же статистических показателей качества: R^2 и A . При этом адекватными будут считаться R^2 не менее 0,7 и A не более 10%.

Коэффициент детерминации R^2 определим по формуле [95]:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y - \hat{y})^2}{\sum (y - \bar{y})^2}, \quad (3.1)$$

где \bar{y} - среднее арифметическое значений y полученных в результате эксперимента.

Средняя ошибка аппроксимации A равна [95]:

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{y - \hat{y}}{y} \right| \cdot 100\%. \quad (3.2)$$

Результаты сопоставления теоретических и экспериментальных графиков изменения температуры воздуха в точке Т7 при комбинированном режиме работы сушильной установки приведены на рисунке 3.9.

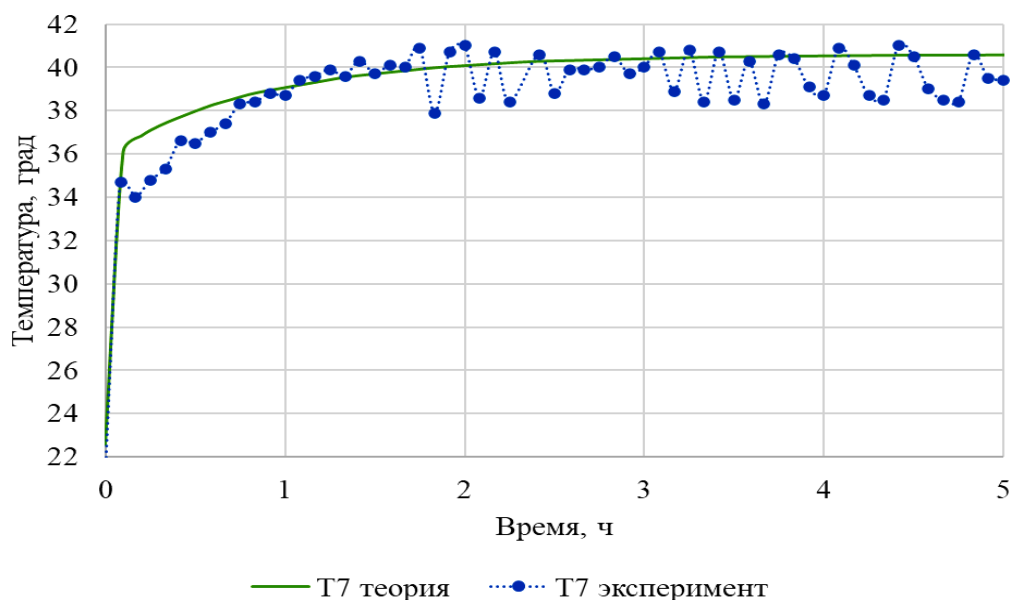


Рисунок 3.9 – Графики изменения температуры воздуха во времени в точке Т7 показанной на рис. 2.11 при использовании комбинированного способа нагрева

По методу наименьших квадратов регрессионное уравнение, максимально точно описывающее теоретический график представленный на рис. 3.9 имеет вид полинома 8 степени:

$$y = -0,012x^8 + 0,307x^7 - 3,281x^6 + 18,799x^5 - 62,236x^4 + 119,734x^3 - 128,006x^2 + 68,859x + 24,721. \quad (3.3)$$

При этом коэффициент детерминации составил $R^2 = 0,956$, средняя ошибка аппроксимации $A = 0,918\%$.

Определим качество полученного регрессионного уравнения относительно экспериментального графика в точке Т7: коэффициент детерминации составляет $R^2 = 0,9606$, что говорит о высоком качестве описания экспериментального графика теоретическим, средняя относительная ошибка аппроксимации $A = 3,1\%$, что меньше 10%, а значит можем сделать вывод о достаточной точности полученных теоретических и экспериментальных данных в точке Т7.

Регрессионное уравнение, максимально точно описывающее изменение температуры воздуха в точке Т6 представленное графиком на рис. 3.10 имеет вид:

$$y = -0,009x^8 + 0,231x^7 - 2,479x^6 + 14,232x^5 - 47,294x^4 + 91,795x^3 - 100,389x^2 + 57,645x + 24,300. \quad (3.4)$$

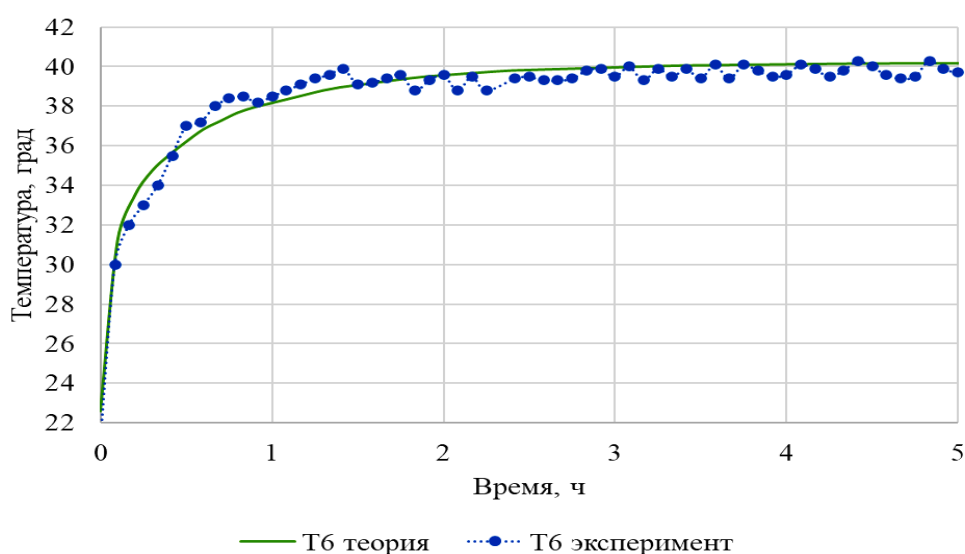


Рисунок 3.10 – Графики изменения температуры воздуха в точке Т6 при использовании комбинированного способа нагрева

При этом коэффициент детерминации составил $R^2 = 0,975$, средняя ошибка аппроксимации $A = 0,736\%$. Качество полученного регрессионного уравнения относительно экспериментального графика в точке Т6: коэффициент детерминации составляет $R^2 = 0,9882$, средняя относительная ошибка аппроксимации $A = 1,64\%$, а значит можем сделать вывод о достаточной точности полученных теоретических и экспериментальных данных в точке Т6.

Регрессионное уравнение, максимально точно описывающее изменение температуры воздуха в точке Т14 представленное графиком на рис. 3.11 имеет вид:

$$y = -0,002x^8 + 0,058x^7 - 0,658x^6 + 4,031x^5 - 14,691x^4 + 32,791x^3 - 44,996x^2 + 37,703x + 22,618. \quad (3.5)$$

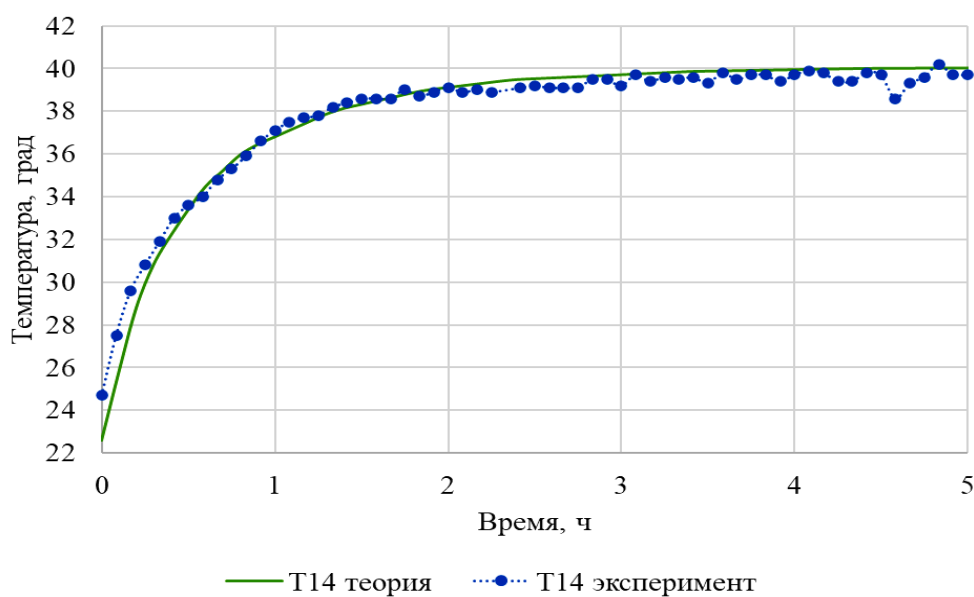


Рисунок 3.11 – Графики изменения температуры воздуха в точке Т14 при использовании комбинированного способа нагрева

Регрессионное уравнение, максимально точно описывающее теоретический график представленный на рис. 3.11 имеет вид:

$$y = -0,002x^8 + 0,058x^7 - 0,658x^6 + 4,031x^5 - 14,691x^4 + 32,791x^3 - 44,996x^2 + 37,703x + 22,618. \quad (3.5)$$

При этом коэффициент детерминации составил $R^2 = 1$, средняя ошибка аппроксимации $A = 0,107\%$. Качество полученного регрессионного уравнения относительно экспериментального графика в точке T14: коэффициент детерминации составляет $R^2 = 0,99$, средняя относительная ошибка аппроксимации $A = 1,54\%$, а значит можем сделать вывод о достаточной точности полученных теоретических и экспериментальных данных в точке T14.

Регрессионное уравнение, максимально точно описывающее изменение температуры воздуха в точке T12 представленное графиком на рис. 3.12 имеет вид:

$$y = 0,001x^8 - 0,036x^7 + 0,360x^6 - 1,834x^5 + 4,801x^4 - 4,572x^3 - 6,529x^2 + 20,991x + 22,162. \quad (3.6)$$

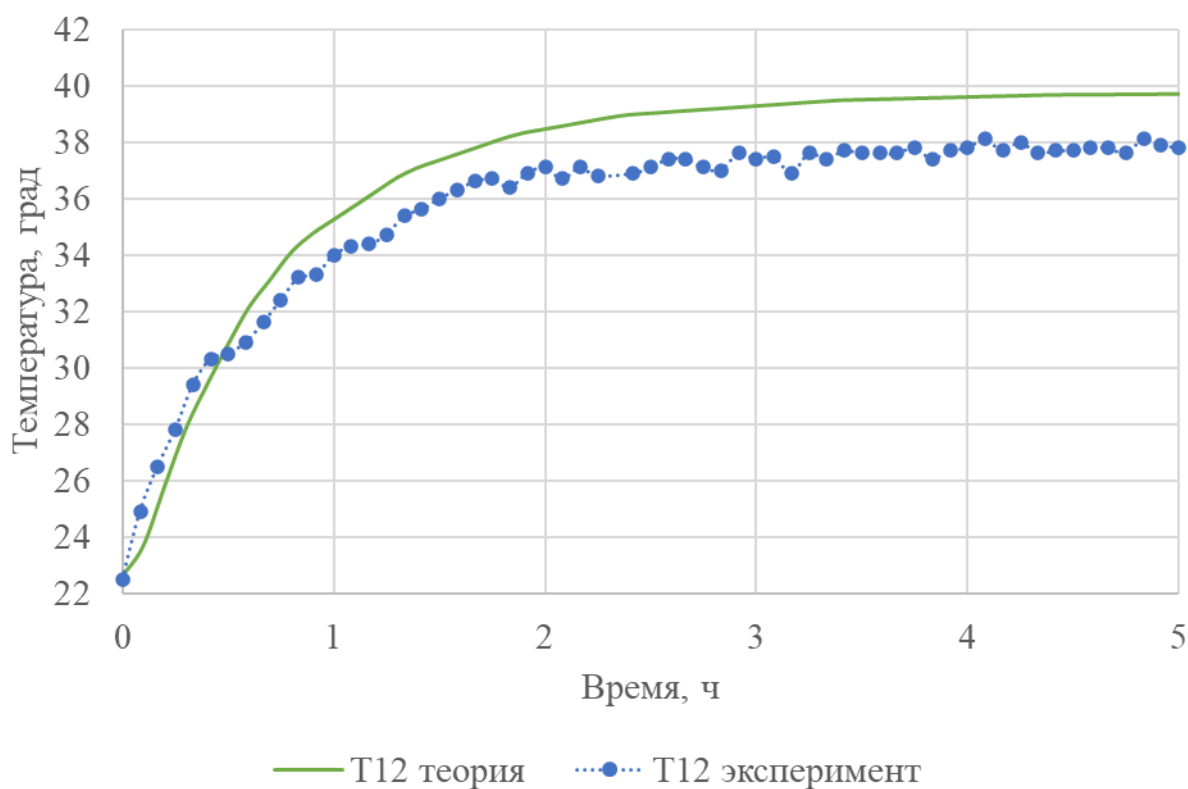


Рисунок 3.12 – Графики изменения температуры воздуха в точке T12 при использовании комбинированного способа нагрева

При этом коэффициент детерминации составил $R^2 = 0,999$, средняя ошибка аппроксимации $A = 0,235\%$. Качество полученного регрессионного

уравнения относительно экспериментального графика в точке T12: коэффициент детерминации составляет $R^2 = 0,84$, средняя относительная ошибка аппроксимации $A = 5,2\%$, а значит можем сделать вывод о достаточной точности полученных теоретических и экспериментальных данных в точке T12.

Регрессионное уравнение, максимально точно описывающее изменение температуры воздуха в точке T11 представленное графиком на рис. 3.13 имеет вид:

$$y = 0,003x^8 - 0,065x^7 + 0,688x^6 - 3,881x^5 + 12,359x^4 - 21,188x^3 + 13,958x^2 + 9,680x + 22,271. \quad (3.7)$$

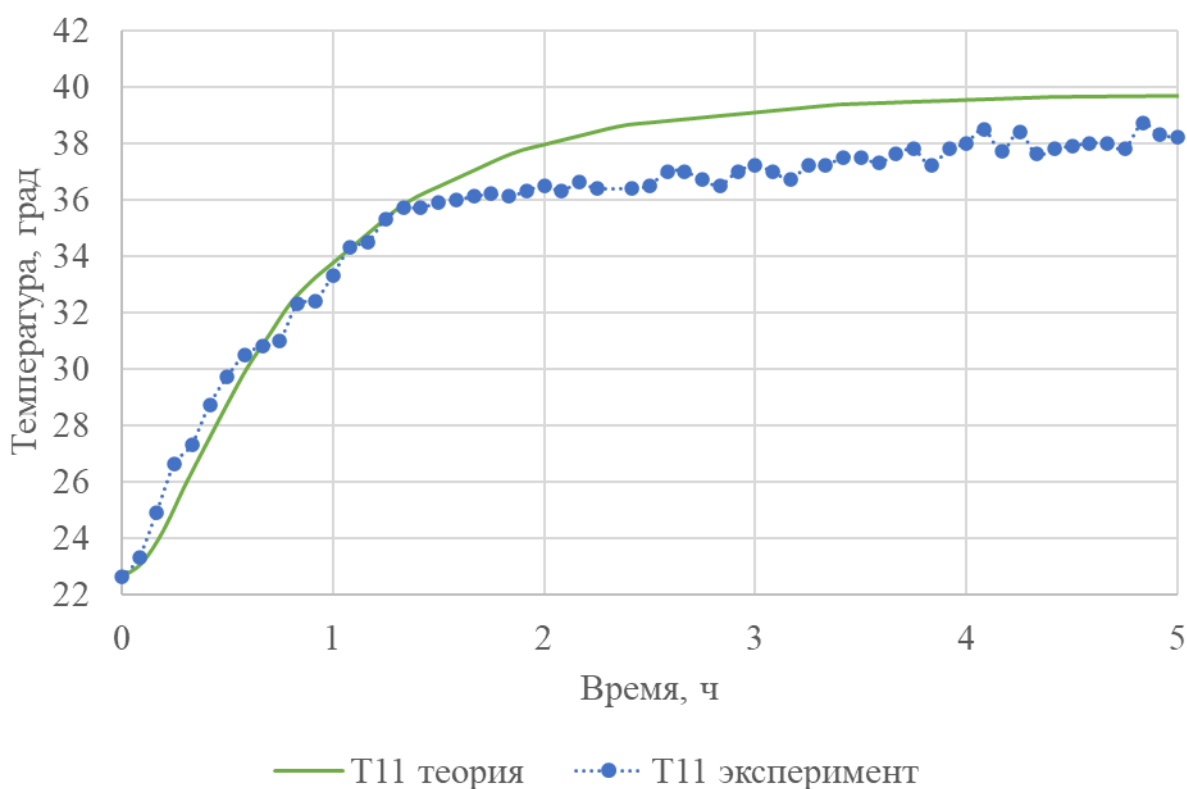


Рисунок 3.13 – Графики изменения температуры воздуха в точке T11 при использовании комбинированного способа нагрева

При этом коэффициент детерминации составил $R^2 = 0,999$, средняя ошибка аппроксимации $A = 0,251\%$. Качество полученного регрессионного уравнения относительно экспериментального графика в точке T11: коэффициент детерминации составляет $R^2 = 0,86$, средняя относительная

ошибка аппроксимации $A = 4,74\%$, а значит можем сделать вывод о достаточной точности полученных теоретических и экспериментальных данных в точке T11.

Регрессионное уравнение, максимально точно описывающее изменение температуры воздуха в точке T13 представленное графиком на рис. 3.14 имеет вид:

$$y = 0,003x^8 - 0,066x^7 + 0,714x^6 - 4,157x^5 + 13,868x^4 - 25,812x^3 + 21,623x^2 + 4,010x + 22,355. \quad (3.4)$$

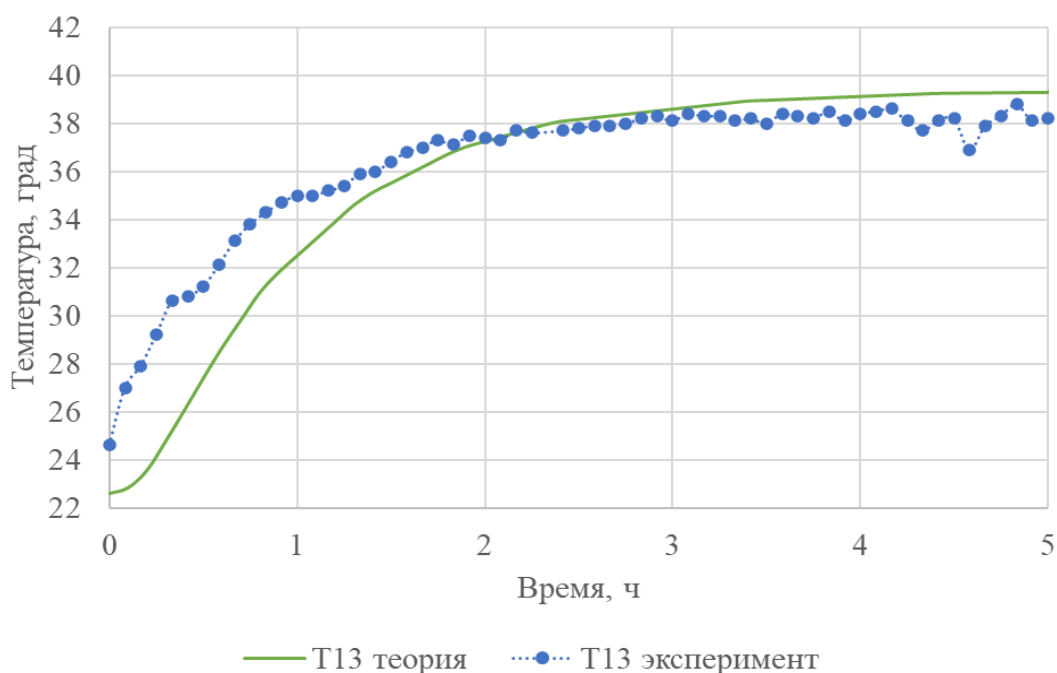


Рисунок 3.14 – Графики изменения температуры воздуха во времени в точке T13 показанной на рис. 2.11 при использовании комбинированного способа нагрева

При этом коэффициент детерминации составил $R^2 = 1$, средняя ошибка аппроксимации $A = 0,227\%$. Качество полученного регрессионного уравнения относительно экспериментального графика в точке T13: коэффициент детерминации составляет $R^2 = 0,9$, средняя относительная ошибка аппроксимации $A = 3,6\%$, а значит можем сделать вывод о достаточной точности полученных теоретических и экспериментальных данных в точке T13.

В ходе эксперимента также были получены графики изменения влажности сушильного агента в течении сушки в точках Н0, Н1 и Н2 показанных на рис. 2.11 (рис. 3.15).

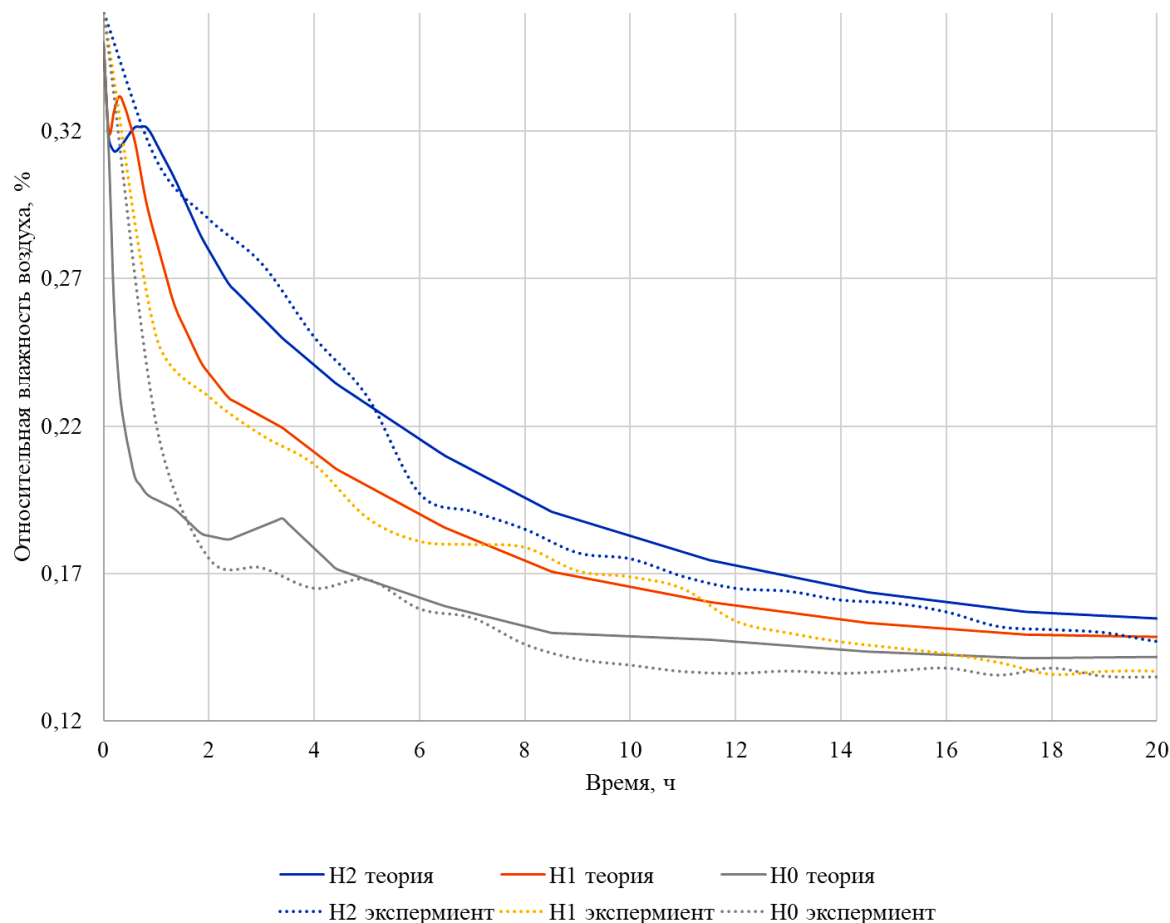


Рисунок 3.15 – Графики изменения влажности воздуха во времени в точках Н0, Н1 и Н2 показанных на рис. 2.11 при комбинированном нагреве

На данных графиках также видна хорошая сходимость теоретических и экспериментальных данных, что говорит об адекватности разработанных ранее моделей тепло- и влагопереноса и их обработки в программном продукте Comsol Multiphysics. Для сравнения теоретических и экспериментальных результатов по влажности использовалась та же методика, что и ранее. Коэффициент детерминации составил не менее 0,8, а средняя ошибка аппроксимации не более 6%.

Что касается влажности гранул пчелиной перги, то за 20 часов она упала до 15%. Что также совпадает и подтверждает сделанные в предыдущей главе выводы об увеличении равномерности и сокращении времени сушки при использовании комбинированного нагрева в сочетании с зигзагообразным каналом, формируемым лотками с продуктом и системой рекуперации сушильного агента. Помимо этого, важной особенностью разработанной сушильной камеры является постоянный сброс части отработанного сушильного агента в окружающую среду, в то время как остальная его часть подаётся вновь к продукту для того, чтобы не пересушить нижние лотки и повысить равномерность сушки, а также использовать повторно ещё не переувлажнённый воздух.

Удельные затраты энергии на сушку перги при комбинированном нагреве составили 0,222 кВт·ч/кг. Данные значения коррелируют со значениями, полученными в результате обработки компьютерной модели за тот же временной промежуток.

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать вывод об адекватности разработанных моделей тепло- и влагопереноса в предыдущей главе. Данные модели позволяют обосновать не только время работы сушильной установки при различных режимах работы, но и минимальную мощность нагревателей, используемых в сушильной камере (330 Вт для нагревателя электрокалорифера и 20 Вт для ИК-нагревателя) и необходимые эффективные режимы (расход воздуха – 46,6 м³/ч, подача системы рекуперации – 12 м/ч).

3.3 Расчет экономической эффективности модернизированной сушильной установки при внедрении на пасеке в 100 пчелиных семей

Предлагаемую сушильную установку можно использовать пчеловодам, которые в основном занимаются получением меда вместе

другой сопутствующей продукцией. В этом случае по статистике в среднем за год можно получить с одного улья до 3 кг перги. При размере пасеке в 100 ульев пчеловод получит общую массу для реализации в размере 300 кг. Также данной установкой могут быть заинтересованы мелкие предприниматели, которые занимаются переработкой пчеловодческой продукции и закупают у пчеловодов пергу в чистом виде или в сотах.

В качестве базовой установки принимаем сушилку фирмы Lyson производства Польши, внешний вид которой представлен на рисунке 3.13.



Рисунок 3.13 – Изображение сушильной установки принятой за базовую при расчёте экономической эффективности

Основные характеристики базовой установки: масса полной загрузки – 20 кг, время сушки 30 ч, удельная энергоёмкость сушки 1,65 кВт·ч/кг, потребляемая мощность 1,1 кВт·ч, цена установки – 63 тыс. рублей.

В результате модернизации сушилки (установка ИК-нагревателя, добавление системы рекуперации) сокращается в 1,7 раза время сушки и уменьшается её удельная энергоёмкость до 0,222 кВт·ч/кг (в результате экспериментальных исследований). Кроме того, качество выходного продукта выше, так как будет получаться перга с равномерной влажностью по всему объёму сушилки, а значит её продажная стоимость увеличится с 2380 рублей до 2800 рублей [77].

Расчет экономической эффективности применения сушильной установки пчелиной перги с рациональными параметрами комбинированного нагрева в пчеловодстве производился на основании действующих методик с

учетом среднегодового уровня инфляции [54, 55, 59, 58].

Получаемый экономический эффект в виде чистого дисконтированного дохода от применения сушильной установки пчелиной перги с рациональными параметрами комбинированного нагрева в пчеловодстве можно определить по формуле [54, 55]:

$$\text{ЧДД} = \sum_{i=1}^T (P_t - I_{\text{э}t}) \cdot \frac{1}{(1 + E_p)^t} - K_{\text{д}}, \quad (3.1)$$

$$\text{ЧДД} = -K_{\text{д}} + (P - I_{\text{э}}) \cdot K_{\text{сд}}, \quad (3.2)$$

где P_t – результаты, на этапе расчета t , руб.; T – период расчета, лет; $K_{\text{д}}$ – сумма дисконтированных капиталовложений, руб.; $K_{\text{сд}}$ – коэффициент дисконтирования, рассчитываемый по формуле:

$$K_{\text{сд}} = \sum_{i=1}^T \frac{1}{(1 + E_p)^t}, \quad (3.3)$$

где E_p – норма дисконта капитала с поправкой на инфляцию.

Норма дисконта E_p реальной процентной ставкой, которая учитывает инфляцию:

$$E_p = \frac{1 + E}{1 + r} - 1, \quad (3.4)$$

где r – уровень инфляции, %; E – ставка процента банка, %.

Срок окупаемости капитальных вложений определяется по формуле:

$$T_{\text{ок}} = \frac{K_{\text{дон}}}{D - I_{\text{э}}}, \quad (3.5)$$

где $K_{\text{дон}}$ – дополнительные капиталовложения, руб.; D – дополнительный доход, руб.; $I_{\text{э}}$ – издержки, руб.

Затраты при использовании сушильной установки на пасеке в 100 пчелиных семей рассчитываются с учётом затрат на электроэнергию. Потребляемая мощность модернизированной установки составляет 330 Вт. Сушка пчелиной перги в ней занимает до 20 часов в зависимости от

параметров наружного воздуха и начальной влажности продукта. За один раз установка обрабатывает 20 кг гранулированной пчелиной перги. Приняв что с пасеки в 100 пчелиных семей можно в год получить 300 кг перги время работы установки составит 300 часов, а затраты электроэнергии – 99 кВт·ч. В случае использования базового варианта: время работы составит 450 часов, затраты электроэнергии – 495 кВт·ч.

Информация о средней норме доходности, годовом уровне инфляции взяты с сайта Центрального банка Российской Федерации [79] и сведены в таблицу 3.1 для двух вариантов: 1) при неблагоприятном прогнозе с большой кредитной ставкой и инфляцией; 2) при условии стабилизации экономической ситуации [78].

Таблица 3.1 – Нормы доходности капитала и уровни инфляции

№	Показатели	1	2	3	4	5
1	Норма доходности (банковская кредитная ставка) по 1 варианту (неблагоприятный прогноз), %	20	19	17	15	12
2	Норма доходности (банковская кредитная ставка) по 2 варианту (благоприятный прогноз), %	8	5	5	4	3
3	Годовой уровень инфляции по 1 варианту (неблагоприятный прогноз), %	32,8	26,0	18,5	17,5	15,5
4	Годовой уровень инфляции по 2 варианту (благоприятный прогноз), %	22,8	16,0	13,5	12,5	10,5

Экономическая эффективность от применения сушильной установки пчелиной перги с рациональными параметрами комбинированного нагрева достигается за счёт продажи качественно высушенной перги по более высоким ценам. Необходимые данные для расчета экономической эффективности сведены в таблицу 3.2

Таблица 3.2 – Данные для расчета ЧДД

№	Показатели	1
1	Стоимость перги, высушенной с помощью базовой установки, руб./кг	2380
2	Стоимость перги, высушенной с помощью предлагаемой установки, руб./кг	2800
3	Затраты на электроэнергию при использовании базовой установки, руб.	4504,5
4	Затраты на электроэнергию при использовании предлагаемой установки, руб.	900,9
6	Валовой годовой доход при использовании базовой установки на пасеке в 100 пчелосемей, тыс. руб.	714
7	Валовой годовой доход при использовании предлагаемой установки на пасеке в 100 семей, тыс. руб.	840

На основе полученных данных произведен расчет ЧДД для обоих вариантов прогноза по банковской кредитной ставке и инфляции на 5 лет.

Таблица 3.3 – Результаты расчёта ЧДД

Показатели	Годы					
	0	1	2	3	4	5
Доход за счёт продажи перги по более высокой цене, тыс. руб.		126	126	126	126	126
Доход от экономии на электроэнергии, руб.		3603,6	3603,6	3603,6	3603,6	3603,6
Отток денежных средств на модернизацию установки, руб.	24000	-	-	-	-	-
Денежные потоки		129,6	129,6	129,6	129,6	129,6
$(1+E)^{-t}$ по 1 варианту		1,107	1,121	1,039	1,090	1,166
$(1+E)^{-t}$ по 2 варианту		1,137	1,220	1,263	1,369	1,421
Дисконтированный годовой доход, тыс. руб. по 1 варианту (не благоприятному)		143,4	145,3	134,6	141,2	151,2
Дисконтированный годовой доход, тыс. руб. по 2 варианту (благоприятному)		147,4	158,2	163,7	177,5	184,2
ЧДД по первому варианту (неблагоприятный прогноз) = 716 тыс. руб.						
ЧДД по второму варианту (благоприятный прогноз) = 831 тыс. руб.						

3.4 Выводы по главе

1. Разработана и изготовлена сушильная установка для гранул пчелиной перги (Патент РФ 2756395), позволяющая проводить сушку продукта в конвективном и комбинированном режимах, имеющая следующие конструкционные параметры: зигзагообразное расположение лотков для снижения влияния переувлажнения перги, систему рекуперации, состоящей из двух вентиляционных каналов.

2. Разработан алгоритм управления сушильной установкой, на основании которого получена соответствующая программа на языке программирования FBD. Получена принципиальная электрическая схема сушилки на базе программируемого реле ПР200 и модуля ввода аналоговых сигналов MB110, позволяющая подключить 12 термосопротивлений. Измерение относительной влажности воздуха проводилось с помощью датчиков НН4000 посредством вывода измеряемых значений на экран ноутбука с помощью микроконтроллерной платформы Arduino Nano.

3. Проведённые экспериментальные исследования показали хорошую сходимость с данными, полученными в ходе компьютерной обработки моделей тепло- и влагопереноса. Коэффициенты детерминации превышали значение 0,8, а средние ошибки аппроксимации не превысили 6%, что говорит о хорошем соответствии теоретических и экспериментальных данных.

4. В течении 20 часов сушки относительная влажность гранул пчелиной перги при использовании комбинированного режима нагрева сушильной установки снизилась с 25% до 15% за 20 часов. При этом удельные затраты энергии на сушку перги были равны 0,222 кВт·ч/кг.

5. Техничко-экономическое обоснование применения сушильной установки пчелиной перги с рациональными параметрами комбинированного нагрева в пчеловодстве произведено для пасеки в 100 пчелиных семей. Расчет производился для двух вариантов экономической ситуации в стране:

при неблагоприятном прогнозе с большой кредитной ставкой и высокой инфляцией; при тренде на стабилизацию экономической ситуации. Экономическая эффективность, выраженная через суммарный чистый дисконтированный доход за пять лет по первому варианту, составляет 716 тыс. рублей, по второму 831 тыс. рублей. Срок окупаемости модернизации установки за счёт дохода от продаж перги по более высокой цене составил для обоих вариантов не более 1 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе компьютерного моделирования в ПО Comsol Multiphysics определены способы интенсификации удаления влаги из продукта и получения равномерности сушки по всему объёму сушильной камеры: установка зигзагообразного канала, формируемого лотками с пергой; добавление в камеру системы рекуперации сушильного агента; использование ИК-нагревателя для уменьшения градиента температур во всём объёме камеры.

2. Разработаны математические модели процессов тепло- и влагопереноса внутри сушильной установки, которые реализованы в программном обеспечении Comsol Multiphysics. Анализ полученных результатов показал следующее: комбинация конвективного и ИК-нагрева позволяет сократить время сушки пчелиной перги в 1,7 раза, уменьшилась разность значений относительной влажности гранул пчелиной перги между нижним и верхним лотками в 2 раза, затраты потребляемой электроэнергии уменьшились в 1,5 раза.

3. На основании разработанной методики определения характеристик пористых продуктов получены параметры слоя гранул пчелиной перги – пористость равна 0,35, проницаемость находится в интервале от $6,1185 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$ в нижнем лотке до $9,5385 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$ в верхнем. Определена изотерма сорбции влаги пергой, график которой может быть описан полиномом третьей степени.

4. В результате реализации полученных мультифизических моделей установлены эффективные режимы работы сушильной установки объёмом $0,3 \text{ м}^3$, максимальной загрузкой 30 кг продукта располагаемого в 5 лотках: система вентиляции воздуха должна обеспечивать отвод наружу теплоносителя с производительностью $46 \text{ м}^3/\text{ч}$, а система рекуперации должна обеспечить подачу агента сушки к нижним лоткам с производительностью $12 \text{ м}^3/\text{ч}$. Рациональными параметрами

комбинированного нагрева являются: мощность калориферной установки – 310 Вт при скорости выходного воздуха 1,6 м/с, мощность ИК-нагревателя – 20 Вт с площадью излучаемой поверхности 0,175 м².

5. Разработана и изготовлена сушильная установка для гранул пчелиной перги позволяющая проводить сушку продукта в конвективном и комбинированном режимах (Патент РФ 2756395). Сравнение полученных экспериментальных данных с модельными значениями по температуре и влажности в фиксированных точках, показало, что относительные ошибки не превышают 3%. Коэффициенты детерминации превышали значение 0,8, а средние ошибки аппроксимации не превысили 6%. При использовании комбинированного режима нагрева в сушильной установке относительная влажность гранул пчелиной перги снизилась с 25% до 15% за 20 часов, а удельные затраты энергии на сушку перги составили 0,222 кВт·ч/кг.

6. Разработан алгоритм управления сушильной установкой, на основании которого получена соответствующая программа на языке программирования FBD. Получена принципиальная электрическая схема сушилки на базе программируемого реле ПР200 и модуля ввода аналоговых сигналов MB110, позволяющая подключить термосопротивления и датчики влажности.

7. Проведен расчет экономической эффективности модернизированной сушильной установки при внедрении на пасеке в 100 пчелиных семей. Общая стоимость модернизации составляет 24 тыс. рублей. За базовый вариант сушильной установки принята сушилка фирмы Lyson производства Польши имеющая следующие параметры: масса полной загрузки – 20 кг, время сушки 30 ч, удельная энергоемкость сушки 1,65 кВт·ч/кг, потребляемая мощность 1,1 кВт, стоимость установки – 63 тыс. рублей. Расчет произведен для двух вариантов экономической ситуации в стране: при неблагоприятном прогнозе с большой кредитной ставкой и высокой инфляцией; при тренде на стабилизацию экономической ситуации. Экономическая эффективность, выраженная через суммарный чистый дисконтированный доход за пять лет

по первому варианту, составляет 716 тыс. рублей, по второму 831 тыс. рублей. Срок окупаемости модернизации установки составил менее года.

Рекомендации производству

В пчеловодческих хозяйствах результаты исследования могут быть использованы при модернизации существующих сушилок конвективного типа, что приведет к снижению энергоемкости процесса сушки и улучшению качества высушенной перги. Для предприятий, изготавливающих сушилки продукции АПК полученные результаты полезны при проектировании и изготовлении новых сушилок с комбинированным нагревом.

Перспективы дальнейшей разработки темы

На основании полученных теоретических и экспериментальных данных можно разрабатывать мультифизические модели сушилок для различных материалов АПК, что позволит сократить энергоемкость процессов и повысит качество выходной продукции. Использование методики определения характеристик пористых продуктов позволит определять пористость и проницаемость многих продуктов сельскохозяйственного производства, что позволит получать наиболее адекватные результаты математического моделирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. с. 1018603 СССР МПК А01К 53/00. Способ сушки цветочной пыльцы / Г.Д. Мадзгарашвили, Д.И. Никурадзе; заявитель и патентообладатель Опытная станция Республиканского научно-производственного объединения пчеловодства. – №3268963/30-15; заявл. 01.04.81; опубл. 23.05.83, Бюл. №31.
2. Афонькина, В. А. Теоретические аспекты обоснования выбора пленочных ИК-излучателей для сушки термолабильных культур [Текст] / В. А. Афонькина // Вестник ЧГАА. – 2012. – Т. 62. – С. 5–9.
3. Билаш, Н.Г. Влияние запасов перги на качество пчёл / Н.Г. Билаш // Пчеловодство. - 1990. - № 4. - С. 6.
4. Блог компании COMSOL: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.comsol.com/blogs/how-to-place-inlet-and-outlet-boundary-conditions-in-cfd-simulations/>
5. Блог компании COMSOL: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.comsol.ru/blogs/which-turbulence-model-should-choose-cfd-application/>
6. Бронников, В.И. Исследование физико-механических свойств перги и воскового вороха / В.И. Бронников, Д.Е. Каширин // Современные энерго и ресурсосберегающие, экологически устойчивые технологии и системы сельскохозяйственного производства: сборник научных трудов. Часть 2. – Рязань: РГСХА, 1999. - С. 70-71.
7. Буренин, Н.Л. Справочник по пчеловодству / Н.Л. Буренин, Г.Н. Котова. – М.: Колос, 1984. -310 с.
8. Бышов, Д.Н. Исследование оптических характеристик перговых сотов /Д.Н. Былов, Д.Е. Каширин, С.С. Морозов // Вестник КрасГАУ. 2019. – № 7 (148). – С. 155-161.
9. Бышов, Д.Н. К вопросу вакуумной инфракрасной сушки перги / Д.Н. Бышов, Д.Е. Каширин, С.Н. Гобелев, С.С. Морозов, А.В. Протасов // Вестник РГАТУ, №1(29), 2016. – С. 56-59

10. Бышов, Н.В. Вопросы теории энергосберегающей конвективной циклической сушки перги: монография / Н.В. Бышов, Д.Е. Каширин. - Рязань: Изд-во РГАТУ, 2012. - 70 с.
11. Винокуров, С.В. Технология и установка для сушки перги в сотах: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Винокуров С.В.; Рязанская государственная сельскохозяйственная академия имени профессора П. А. Костычева. – Рязань, 2002. – 196 с.
12. Вороненко, Б.А. Анализ характера особенностей тепломассообмена в дискретной насыпи пищевого продукта / Б.А. Вороненко, А.Г. Леу, Э.В. Абушинов, И.П. Юхник // В сборнике: Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики. - 2020. С. 713-716.
13. Вороненко, Б.А. Аналитическое решение дифференциальных уравнений тепло- и влагопереноса при инфракрасном нагреве масличных семян / Б.А. Вороненко, А.С. Демидов, С.Ф. Демидов // Процессы и аппараты пищевых производств. – 2012. - №1. – С. 17.
14. Гинзбург, А.С. Расчет и проектирование сушильных установок пищевой промышленности / А.С. Гинзбург. - М.: Агропромиздат, 1985.- 336 с.
15. Гинзбург, А.С. Сушка пищевых продуктов / А.С. Гинзбург. - М.: Пищепромиздат, 1960. - 683 с.
16. Гордиевских, М. Л. Исследование зависимостей процесса сушки и обеззараживания пчелиной обножки в «кипящем слое» теплого озонированного воздуха / М.Л. Гордиевских, Т.А. Пыхтина // Материалы ЛП Международной научно-технической конференции «Достижения науки-агропромышленному производству». – Рязань, 2013. – Ч.3. – С. 140-146.
17. Гришин, М.А. Установки для сушки пищевых продуктов: Справочник / М.А. Гришин, В.И. Атаназевич, Ю.Г. Семёнов. - М.: Агропромиздат, 1989. - 215 с.
18. Данилов, О.Л. Теория и расчет сушильных установок пищевой промышленности / О.Л. Данилов. - М.: Агропромиздат, 1983. - 255 с.

19. Данилов, О.Л. Экономия энергии при тепловой сушке / О.Л. Данилов, Б.И. Леончик. -М.: Энергоиздат, 1986. - 136 с.
20. Джарвис, Д. С. Мед и другие естественные продукты / Д. С. Джарвис. - Бухарест: Апимондия, 1975. - 136 с.
21. Документация на модуль CFD программы Comsol Multiphysics. Comsol.Inc. – 710 p.
22. Дорофеюк, М.Т. Перга ранней весной / М.Т. Дорофеюк // Пчеловодство. – 1982. – № 4. – С. 23-24.
23. Журавлев, А.В. Установка для сушки перговых сотов / А.В. Журавлев // В мире научных открытий: материалы Всероссийской студенческой научно-практической конференции. - Ульяновск: УГСХА им. П. А. Столыпина, 2012. - Том III. - С. 103-105.
24. Завалий, А.А. Расчётное моделирование процесса динамической инфракрасной сушки в многоярусном шкафовом устройстве / А.А. Завалий, Д.В. Ермолин, М.А. Сергеев // Известия сельскохозяйственной науки Тавриды. – 2021. – № 27 (190). – С. 76-86.
25. Завалий, А.А. Сравнительная оценка энергоэффективности сушки ягод в компактных устройствах конвективной и инфракрасной сушки / А.А. Завалий, Л.А. Лаго, А.С. Рыбалко // Известия сельскохозяйственной науки Тавриды. – 2020. – № 23 (186). – С. 130-140.
26. Зазулевич, Б.В. Справочник мастера сушильного производства / Б.В. Зазулевич и др. - М.: Агропромиздат, 1985. - 175 с.
27. Иваненко, Т.П. Заготовка и хранение перги / Т.П. Иваненко // Пчеловодство. - 1960. - №5. - С. 43.
28. Иванец, В.Н. Процессы и аппараты пищевых производств [Текст]: учебное пособие / В.Н. Иванец, И.А. Бакин, С.А. Ратников. – Кемерово: Кемеровский технологический институт пищевой промышленности, 2044. – 180 с.
29. Исаченко, В.П. Теплопередача / В.П. Исаченко и др. - М.: Энергоиздат, 1969. - 417 с.

30. Каширин, Д.Е. Вакуумная сушка перги // Пчеловодство. — 2006 — № 4. — С. 50
31. Каширин, Д.Е. Качество перги, стабилизированной различными способами, в процессе ее хранения / Д.Е. Каширин, М.Н. Харитонов // Инновационные технологии в пчеловодстве. Мат. науч.-практ. конф. 21-23 ноября 2005 г. – Рыбное, 2006. - С.195-197.
32. Каширин, Д.Е. Конвективная сушка перги / Д.Е. Каширин // Пчеловодство. - 2009. - № 8. - С. 46-47.
33. Каширин, Д.Е. Сушка перги в сотах / Д.Е. Каширин, М.Н. Харитонов // Успехи апитерапии: материалы 13 Всероссийской научно-практической конференции. - Рыбное, 2008. - С. 183-186.
34. Каширин, Д.Е. Энергосберегающая установка для сушки перги / Д.Е. Каширин // Вестник КрасГАУ. - 2009. - № 12. - С. 189-191.
35. Каширин, Д.Е. Энергосберегающая установка для сушки перги в сотах / Д.Е. Каширин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. - 2009. - № 10. - С. 24-25.
36. Каширин, Д.Е. Энергосберегающие технологии извлечения перги из сотов специализированными средствами механизации: автореф. ... дис. д-ра. техн. наук. – Рязань: 2013. – 38 с.
37. Комаров, А.А. Пчеловодство. Учебно-справочная книга. / А.А. Комаров. Тула: Ритм, 1992. - 224 с.
38. Комиссар, А.Д. Перга - новый продукт пчеловодства / А.Д. Комиссар, Г.А. Миронов // Пчеловодство. - 1993. - № 3. - С 42.
39. Кривцов, Н.И. Получение и использование продуктов пчеловодства / Н.И. Кривцов, В.И. Лебедев. - М.: Нива России, 1993. - 285 с.
40. Кривцов, Н.И. Энциклопедия пчеловодства: Справочник / Н.И. Кривцов, В.И. Лебедев, Г.Ф. Таранов. - М.: Информагромех, 1997. - 401 с.
41. Кудрявцева, А.А. Режимы и параметры энергосберегающей электронагревательной установки ульев: дис. ... канд. техн. наук:

- 05.20.02 / Кудрявцева А.А.; Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина. – Краснодар, 2019. – 189 с.
42. Купреенко, А.И. Сушилка аэродинамического подогрева / Х.М. Исаев, А.И. Купреенко, И.И. Коновалова // Сельский механизатор. – 2016. – № 10. – С. 5
43. Курдюмов, В.И. Повышение качества тепловой обработки сыпучих материалов в установке контактного типа / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, Г.В. Карпенко, С.А. Сутягин, В.И. Долгов, Д.А. Новичков, П.С. Агеев // Материалы VIII международной научно-практической конференции. Аграрная наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения. Часть I. – Ульяновск, УГСХА, 2017. – С. 229-233.
44. Курдюмов, В.И. Результаты производственных исследований установки контактного типа для тепловой обработки зерна / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, Г.В. Карпенко // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2016. – № 2 (34). – С. 174-178.
45. Лебедев, В.И. Научно обоснованная технология получения перги на пасеке / В.И. Лебедев, М.Н. Харитонов // Сборник научно-исследовательских работ по пчеловодству. – Рыбное, 2016. – С. 122-129.
46. Лебедев, П.Д. Расчет и проектирование сушильных установок. – М.-Л.: Государственное энергетическое издательство, 1963.
47. Лыков, А.В. Тепло- и массообмен в процессах сушки / А.В. Лыков. - М.: Госэнергоиздат, 1956. - 464 с.
48. Лыков, А.В. Теория сушки / А.В. Лыков. - М.: Энергия, 1968. - 470 с.
49. Малин, Н.И. Моделирование кинетики двухступенчатой рециркуляционной сушки зерна / Н.И. Малин // Международный технико-экономический журнал. – 2019. – № 4. – С. 7-14.
50. Малин, Н.И. Термоустойчивость и неравномерность нагрева как факторы воздействия на режим сушки зерна / Н.И. Малин //

Международный технико-экономический журнал. – 2018. – № 4. – С. 26-36.

51. Мамонов, Р.А. Результаты испытания сушилки перги / Р.А. Мамонов, К.Е. Бубенчиков // Принципы и технологии экологизации производства в сельском, лесном и рыбном хозяйстве: Материалы 68-ой международной научно-практической конференции, посвященной Году экологии в России. – Рязань: Издательство РГАТУ, 2017.– С. 165-168.
52. Мамонов, Р.А. Теоретическо-экспериментальное исследование машин для получения перги: дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.01 / Мамонов Р.А.; Рязанский государственный агротехнологический университет имени П. А. Костычева. – Рязань, 2018. – 354 с.
53. Мачекас, А.Ю. О хранении пыльцы / А.Ю. Мачекас, К.В. Кадаеускис // Пчеловодство. - 1987. - № 2. - С. 29-30.
54. Методика определения экономической эффективности технологий и сельскохозяйственной техники. - М.: Минсельхозпрот России, 1998. – 220.;
55. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов и их отбору для финансирования. – М.: Информэлектро, 1994.- 141 с.;
56. Некрашевич, В.Ф. Определение периодов обдува перговых сотов нагретым и атмосферным воздухом при их конвективной сушке в осциллирующем режиме / В.Ф. Некрашевич, В.И. Бронников, С.В. Винокуров // Перспективные разработки в области механизации сельского хозяйства: Сб. науч. тр. - Рязань, 2001. - С. 15-17.
57. Некрашевич, В.Ф. Способы сушки перговых сотов / В.Ф. Некрашевич, В.И. Бронников, С.В. Винокуров // Материалы межвузовской научно-практической конференции: Сб. науч. тр., Т II / КГСХА - Кострома, 2000. - С. 58-59.
58. Овсянников Д. А. Оценка экономической эффективности использования озonoобработки для повышения медопродуктивности пчел / Овсянников

Д. А., Заболотная И. А. – В кн.: Материалы межвузовской научной конференции факультетов механизации, энергетики и электрификации «Энергосберегающие технологии и процессы в АПК». – Краснодар: КГАУ, 2003. – 2 с.

59. Овсянников Д. А. Техничко-экономическое обоснование применения технологии стимуляции электроозонированием весеннего развития пчелиных семей / Овсянников Д. А., Николаенко С.А., Шмагайло С.А. – В кн.: Материалы III Российской научно-практической конференции «Физико-технические проблемы создания новых технологий в агропромышленном комплексе». – Ставрополь, 2005. – 4 с.;
60. Оськин, С. В. Рекомендации для выполнения и защиты диссертации: учеб. пособие / С. В. Оськин – Краснодар: КубГАУ, 2015. – 63 с.
61. Оськин, С. В. Рекомендации для подготовки научного доклада об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации): учеб. пособие / С. В. Оськин – Краснодар: КубГАУ, 2015. – 80 с.
62. Оськин, С. В. Электротехнологии в сельском хозяйстве: учебник для студентов вузов / С. В. Оськин. – Краснодар: КубГАУ, 2016. – 501 с.
63. Оськин, С. В. Электротехнологические установки: учебник для вузов / С. В. Оськин. – Краснодар: ООО «КРОН», 2016.– 339 с.
64. Пат. 2275563 Российская Федерация, МПК F26В 3/04, F26В 21/04. Установка для сушки перги в сотах / Д.Е. Каширин; заявитель и патентообладатель Рязанская государственная сельскохозяйственная академия им. проф. П. А. Костычева. – № 2004134870/06; заявл. 29.11.2004; опубл. 27.04.2006, Бюл. №12.
65. Пат. 2391610 Российская Федерация, МПК F26В 9/06. Установка для сушки перги / Д.Е. Каширин; заявитель и патентообладатель Д.Е. Каширин. – № 2009109542/06; заявл. 16.03.2009; опубл. 10.06.2010, Бюл. №16.
66. Пат. 2498178 Российская Федерация, МПК F26В 9/06. Устройство для сушки перговых сотов / В.И. Курдюмов, А.В. Журавлёв; заявитель и

патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Ульяновская государственная сельскохозяйственная академия имени П. А. Столыпина". – № 2012122841/06; заявл. 01.06.2012; опубл. 10.11.2013, Бюл. №31.

67. Пат. 2498179 Российская Федерация, МПК F26B 9/06. Устройство для сушки перговых сотов / В.И. Курдюмов, А.В. Журавлёв; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Ульяновская государственная сельскохозяйственная академия имени П. А. Столыпина". – № 2012122845/06; заявл. 01.06.2012; опубл. 10.11.2013, Бюл. №31.
68. Пат. 2549380 Российская Федерация, МПК F26B 15/04. Устройство для сушки перговых сотов / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, А.В. Журавлёв; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Ульяновская государственная сельскохозяйственная академия имени П. А. Столыпина". – № 2014116334/06; заявл. 22.04.2014; опубл. 27.04.2015, Бюл. №12.
69. Пат. 2578782 Российская Федерация, МПК F26B 9/06. Установка для сушки перги / Д.Е. Каширин, С.Н. Гобелев, Д.Н. Бышов, М.А. Милютин, А.А. Полякова; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Рязанский государственный агротехнологический университет имени П. А. Костычева" (ФГБОУ ВПО РГАТУ). – № 2015109205/06; заявл. 16.03.2015; опубл. 27.03.2016, Бюл. №9.
70. Пат. 2660575 Российская Федерация, МПК F26B 9/06, F26B 5/04, F26B 25/10. Установка для сушки перги / Д.Е. Каширин, С.Н. Гобелев, Д.Н. Бышов, С.С. Морозов; заявитель и патентообладатель Федеральное

государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Рязанский государственный агротехнологический университет имени П. А. Костычева" (ФГБОУ ВО РГАТУ). – № 2016136571; заявл. 12.09.2016; опубл. 06.07.2018, Бюл. №19.

71. Пат. 2756395 Российская Федерация, МПК F26B 9/06, F26B 5/02, F26B 7/00. Установка для комбинированной сушки перги / Н.И. Богатырёв, С.В. Оськин, С.Н. Харченко, Д.С. Цокур, А.И. Хаернасова; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина». – № 2021100928; заявл. 18.01.2021; опубл. 30.09.2021, Бюл. №128.
72. Пат. 2758017 Российская Федерация, МПК F26B 9/06, F26B 3/30, F26B 21/04. Установка для сушки перги / Д.Н. Бышов, Д.Е. Каширин, С.Н. Гобелев, В.В. Павлов, П.Э. Бочков; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Рязанский государственный агротехнологический университет имени П. А. Костычева". – № 2020142599; заявл. 22.12.2020; опубл. 25.10.2021, Бюл. №30.
73. Попов, В. М. Использование пленочных электронагревателей для повышения эффективности послеуборочной обработки семян рапса [Текст] / В. М. Попов, В. А. Афонькина, Е. И. Шукшина [и др.] // Материалы ЛП междунар. науч.-техн. конф. «Достижения науки – агропромышленному производству». – Челябинск: ЧГАА, 2013. – Ч. V. – С. 238–243.
74. Попов, В.М. Исследование зависимости между оптическими свойствами ИК-излучателей и спектральными характеристиками томатов / В.М. Попов, В.А. Афонькина, В.Н. Левинский, Д.А. Ветошев // В сборнике: Актуальные вопросы агроинженерных и сельскохозяйственных наук: теория и практика. Материалы национальной научной конференции Института агроинженерии, Института агроэкологии, 2019. – С. 93-98.

75. Попов, В.М. Исследование и согласование оптических свойств ИК-излучателей и спектральных характеристик яичного сырья / В.М. Попов, В.А. Афонькина, В.Н. Левинский // АПК России, 2019. – Т. 26. № 4. – С. 558-562.
76. Сайт MBFinance.ru: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://mbfinance.ru/investitsii/prognozy-i-analitika/klyuchevaya-stavka-tsb-prognoz/>
77. Сайт medovs.ru: [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://medovs.ru/catalog/produktsiya_pchelovodstva_optom/32519/
78. Сайт агентства прогнозирования экономики: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://apecon.ru/prognoz-inflyatsii-na-gody-v-rossii>
79. Сайт центрального банка России: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.cbr.ru>
80. Самарина, Ю.Р. Совершенствование процесса сушки гранулированных кормов: автореф. ... дис. канд. техн. наук. – Благовещенск: 2007. – 19 с.
81. Страускене, А.Э. Что мы знаем о перге / А.Э. Страускене, К.В. Кадзяускене // Пчеловодство. – 1990. – №7. – С. 30.
82. Таранов, Г.Ф. Книга пчеловодства / Г.Ф. Таранов, В.И. Лебедев. - М.: Росагропромиздат, 1992. - 251 с.
83. Тепляшин, В.Н. Технологии и оборудование для сушки растительного сырья [Электронный ресурс]: учеб. Пособие / В.Н. Тепляшин, Л.И. Ченцова, В.Н. Невзоров; Краснояр. гос. аграр. ун-т. – Красноярск, 2019. – 173 с.
84. Федоров, Н.Е. Аналитический расчет сушильных установок / Н.Е. Федоров. - М.: Пищевая промышленность, 1967. - 304 с.
85. Фомина, В.А. Перга в кардиологии / В.А. Фомина, В.Г. Околоков и др. // Пчеловодство. - 1994. - № 2. - С. 58.
86. Харитонов, М.Н. Методы сушки и качество перги / М.Н. Харитонов // Пчеловодство. – 2011. – №8. – С.56-57.

87. Харитонов, М.Н. Оценка влияния методов стабилизации на качество перги / М.Н. Харитонов, Н.Н. Харитонов, Л.А. Бурмистрова // Вестник ФГБОУ ВПО РГАТУ, №2(14), 2012. – С. 32-35.
88. Харченко, С. Н. Критерии и параметры технического состояния оборудования / Харченко С.Н., Максименко Е.А. // Евразийское Научное Объединение. 2020. № 11-2 (69). С. 145-148.
89. Харченко, С. Н. Моделирование технологического процесса сушки перги / С. В. Оськин, С. Н. Харченко // В сборнике: Физико-технические проблемы создания новых технологий в агропромышленном комплексе. Материалы XIV Международной научно-практической конференции. Под редакцией М.А. Мастепаненко, Г.П. Стародубцевой [и др.]. Ставрополь. – 2021. – С. 33-37.
90. Харченко, С. Н. Моделирование технологического процесса сушки перги / С. Н. Харченко // сборник тезисов по материалам всероссийской научно-практической конференции. Отв. за выпуск А. Г. Коцаев. Краснодар. – 2021. – С. 166.
91. Харченко, С. Н. Определение пористости и проницаемости засыпки из гранул перги для моделирования процессов её сушки / Харченко С.Н. // Сельский механизатор. 2021. № 12. С. 20-21.
92. Харченко, С. Н. Приоритетные направления развития интеграционных и кооперационных связей в агроэкономике / Хатит Р. А., Харченко С. Н. // В сборнике: Экономика и управление в условиях современной России. Материалы всероссийской научно-практической конференции. 2018. С. 308-310.
93. Харченко, С. Н. Установка для сушки пчелиной перги / С. В. Оськин, С. Н. Харченко, Д. С. Цокур, Д. М. Таранов // Сельский механизатор. – 2021. №6. – С. 20-21.
94. Харченко, С. Н. Эффективный процесс сушки пчелиной перги / С. В. Оськин, Д. С. Цокур, А. П. Волошин, С. Н. Харченко // Сельский механизатор. – 2020. № 5–6. – С. 28–29.

95. Цокур, Д. С. Методика экспериментальных исследований: метод. указания по выполнению курсовой работы / Д. С. Цокур – Краснодар: КубГАУ, – 2019. 65 с.
96. Шкендеров, С. Продукты пчеловодства / С. Шкендеров, Ц. Иванов. - София: Зениздат, 1985. - 151 с.
97. Datta A.K. Porous media approaches to studying simultaneous heat and mass transfer in food processes. II: Property data and representative results. *Journal of Food Engineering* 80, 2007. – pp. 96-110.
98. Datta A.K. Porous media approaches to studying simultaneous heat and mass transfer in food processes. I: Problem formulations. *Journal of Food Engineering* 80, 2007. – pp. 80-95.
99. Jinxin Zhong, Congliang Huang, Dongxu Wu, Zizhen Lin. Influence Factors of the Evaporation Rate of a Solar Steam Generation System: a Numerical Study. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018. – pp. 860-864.
100. Karolina Pelka, Randy W Worobo, Justyna Walkusz, Piotr Szweda. Bee Pollen and Bee Bread as a Source of Bacteria Producing Antimicrobials. *Antibiotics* 10(6):713. 2021.
101. Kharchenko S. N., Oskin S. V., Tsokur D. S. Using comsol multiphysics in study of beebread drying modes. *Engineering for Rural Development*, 2021, 20, pp. 611–616.
102. Kharchenko, S., Oskin, S., Tsokur, D. Modeling of bee-bread drying process. *Engineering for Rural Development*, 2020, 19, pp. 445–449.
103. Muammer Kaplan, Ilknur Demirtas, Sibel Silici. Determination of Phytosterols in Beebread from Different Botanical Origin. *Journal of Traditional Medical Complementary Therapies* 2(3):89-96. 2019.
104. Xuan Luo, Yating Dong, Chen Gu, Xueli Zhang. Processing Technologies for Bee Products: An Overview of Recent Developments and Perspectives. *Frontiers in Nutrition* 8. 2021.

Методика определения изотермы сорбции влаги

Определение зависимости влагосодержания w в перге от относительной влажности окружающего воздуха ϕ проводилось на базе ООО «Холмский КХП». Методика работы была следующей:

1. В эксикаторах при температуре окружающего воздуха 23 °С с помощью водных растворов серной кислоты с различным процентом её содержания были созданы условия, гарантирующие определённое значение влажности воздуха над поверхностью используемых растворов согласно табл. П1.1. Для создания необходимых условий эксикаторы с помещёнными в них растворами были выдержаны в течении суток.
2. Высушенные образцы гранул перги, а также измельчённого продукта каждый весом 5 г. были помещены в эксикаторы и оставлены в них на двое суток (рис. П2.1).
3. Образцы перги были взвешены и просушены для определения влагосодержания в них.
4. По полученным данным, которые представлены в табл. П2.2 была построена изотерма сорбции влаги для гранул пчелиной перги (рис. 2.12).



Рисунок П1.1 – Изображение эксикаторов с водным раствором серной кислоты и образцами перги в них

Таблица П1.1 – Зависимость относительной влажности воздуха над поверхностью водного раствора H_2SO_4 от её процентного содержания в нём при 23 °С

Концентрация H_2SO_4 , %	10	20	30	35	40	45	50	55	60	65
Влажность, %	95,5	88	75	66,5	56,5	45,5	35	25	16	9

Таблица П1.2 – Результаты эксперимента по определению изотермы сорбции влаги в перге при 23 °С

Количество влаги	Влажность окружающего образец воздуха в эксикаторе, %						
	9	16	35	56,5	75	88	95,5
в образцах с гранулами перги, г	0,05	0,09	0,23	0,30	0,45	0,67	0,94
в образцах с измельчённой пергой, г	0,04	0,10	0,22	0,30	0,42	0,69	0,8

Измерение веса перги производилось с помощью лабораторных электронных весов (рис. П1.2).



Рисунок П1.2 – Лабораторные электронные весы с образцами перги

Графики изменения давлений вдоль верхней и нижней границ лотков полученные при моделировании потоков воздуха внутри сушильной камеры для определения проницаемости пчелиной перги

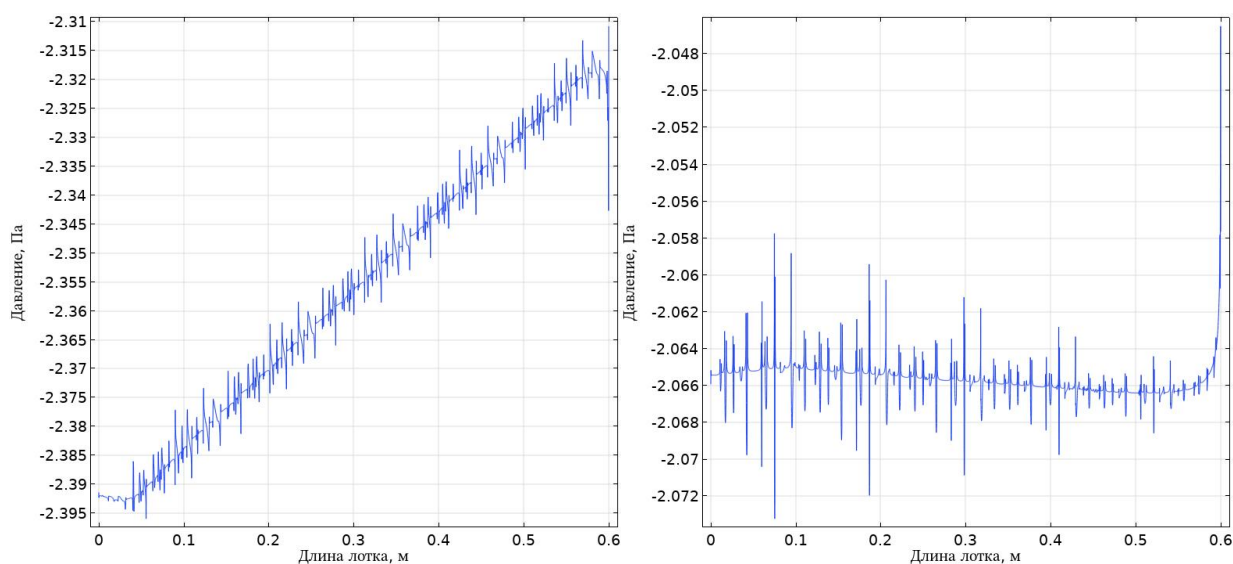


Рисунок П2.1 - Значения давлений вдоль верхней (слева) и нижней (справа) границ первого лотка

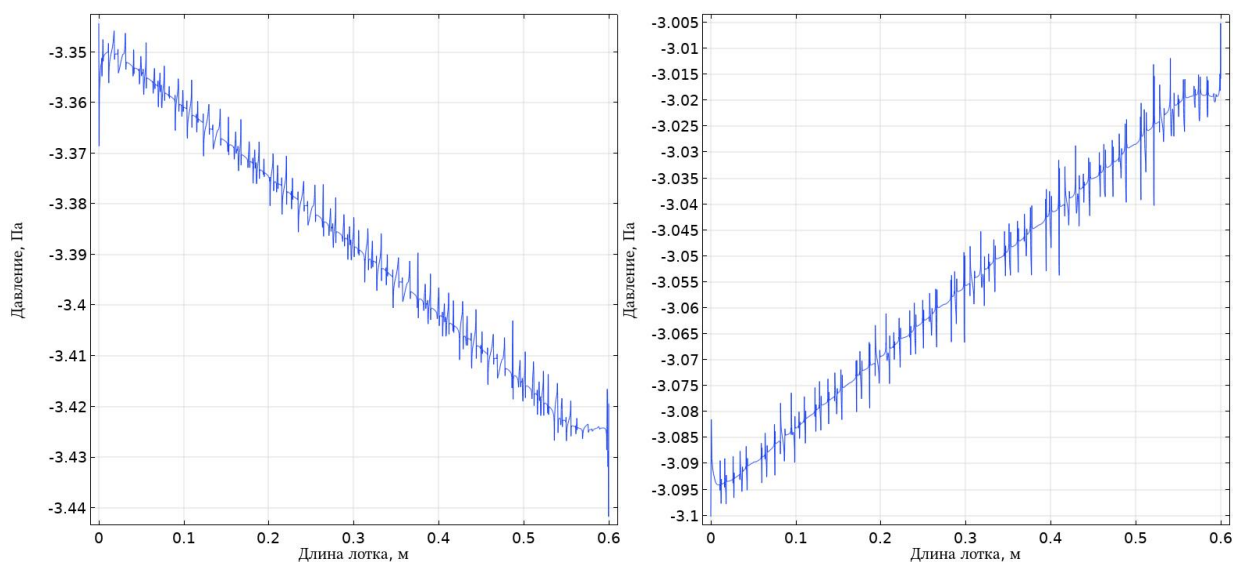


Рисунок П2.2 - Значения давлений вдоль верхней (слева) и нижней (справа) границ второго лотка

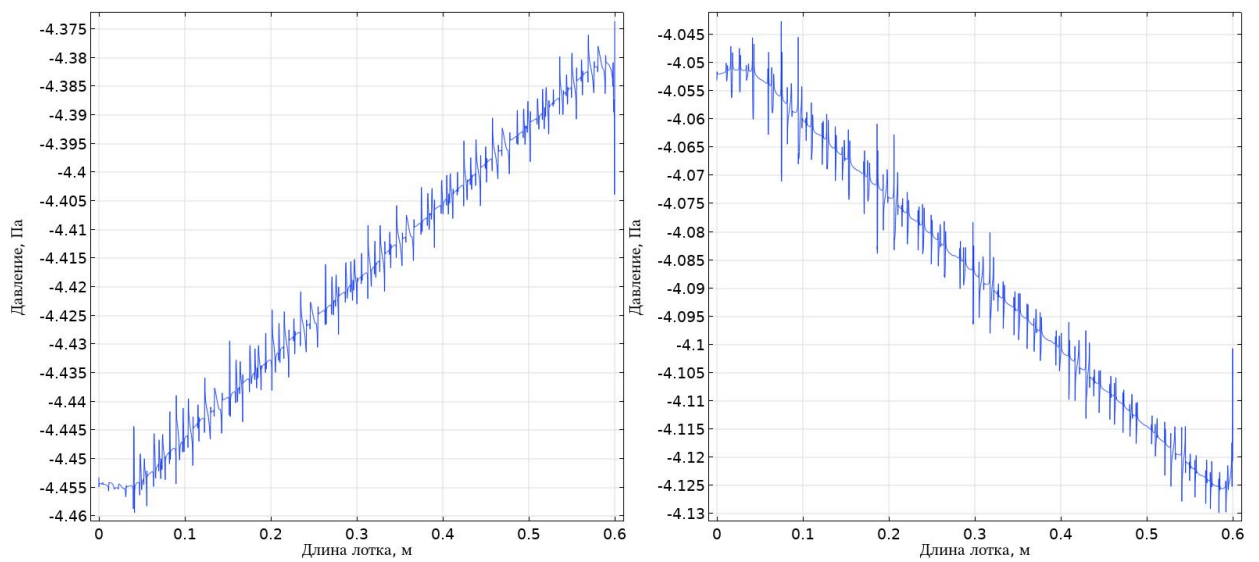


Рисунок П2.3 - Значения давлений вдоль верхней (слева) и нижней (справа) границ третьего лотка

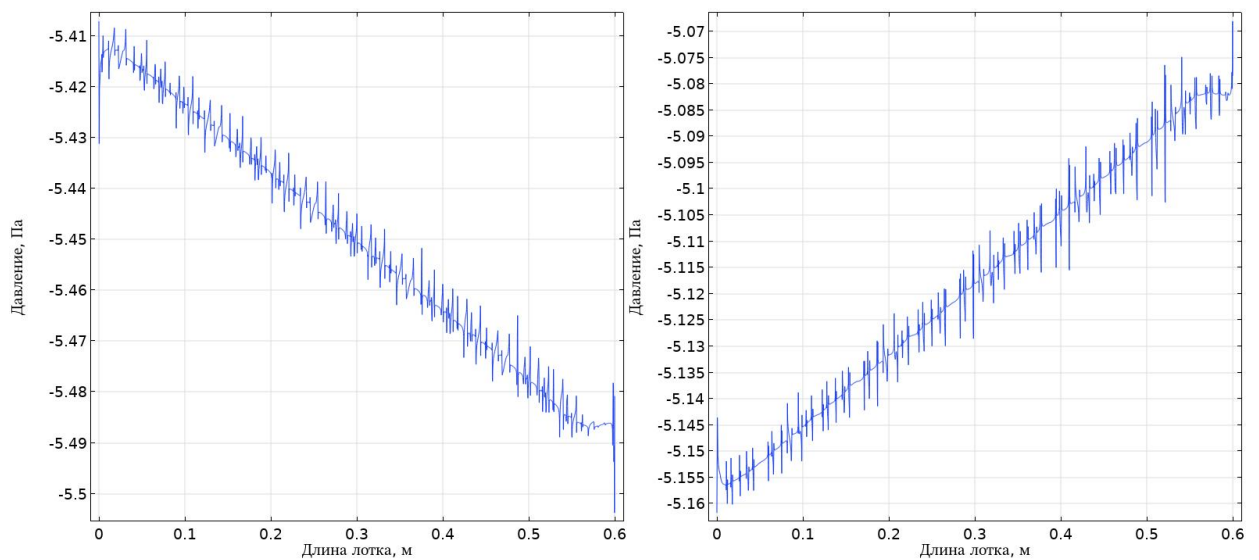


Рисунок П2.4 - Значения давлений вдоль верхней (слева) и нижней (справа) границ четвёртого лотка

Программа для считывания показаний с датчиков влажности HIH4000 с помощью микроконтроллерной платформы Arduino Nano и вывода получаемых значений через монитор порта на экран ЭВМ

```
int HIH4000_Pin_0 = A0; // объявление номера пина для датчика H0
int HIH4000_Pin_1 = A1; // объявление номера пина для датчика H1
int HIH4000_Pin_2 = A2; // объявление номера пина для датчика H2

void setup()
{
// определение скорости обмена данными между микроконтроллером и
ноутбуком
    Serial.begin(9600);
}

void loop()
{
// считывание значений напряжения на пинах к которым подключены
датчики и их запись в соответствующие переменную
    float relativeHumidity_0 = analogRead(HIH4000_Pin_0);
    float relativeHumidity_1 = analogRead(HIH4000_Pin_1);
    float relativeHumidity_2 = analogRead(HIH4000_Pin_2);

// преобразование полученных значений напряжения в значения
относительной влажности воздуха
    float av_0=0.0048875*relativeHumidity_0;
    float av_1=0.0048875*relativeHumidity_1;
    float av_2=0.0048875*relativeHumidity_2;
```

```
float res_0=(av_0-0.86)/0.03;
float res_1=(av_1-0.86)/0.03;
float res_2=(av_2-0.86)/0.03;

// отправка полученных значений влажности воздуха на экран ноутбука через
монитор порта
    Serial.print("H_0=");
    Serial.println(res_0);
    Serial.print("H_1=");
    Serial.println(res_1);
    Serial.print("H_2=");
    Serial.println(res_2);

// задержка на последующее измерение
    delay(5000);
}
```

ДОКУМЕНТЫ ПО ВНЕДРЕНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ
ИССЛЕДОВАНИЙ

УТВЕРЖДАЮ

ООО «Предприятие по пчеловодству
«Краснодарское»

ИНН 2310010997,

350002, Краснодарский край,

Краснодар, ул. Садовая, д. 50

Директор организации



 Карцев В. И.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы
Харченко Сергея Николаевича

Комиссия в составе: заведующего кафедрой "Электрические машины и электропривод" ФГБОУ "Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина", д.т.н., профессора Оськина С.В., к.т.н. Цокура Д.С., аспиранта Харченко С.Н. составили акт о том, что результаты диссертационной работы "Эффективные режимы работы сушильной установки пчелиной перги с рациональными параметрами комбинированного нагрева", выраженной в виде сушилки пчелиной перги с емкостью загрузки порядка 20 кг переданы предприятию на предмет производственной проверки и дальнейшему использованию в работе. Сушилка с комбинированным нагревом была изготовлена в Кубанском ГАУ (пат. РФ на изобретение RU2756395C1, 30.09.2021. Заявка №2021100928) показала свою эффективную работу, удобство в управлении и высокое качество выходной продукции. Так после сушки 53 кг перги удельная энергоемкость производства составила 0,2 кВт ч/кг; разница относительной влажности выходного продукта между верхним и нижним лотками была 0,01%, время сушки с начальной влажности 20% до конечной влажности 12% составило 23 часа.

Председатель комиссии:
заведующий кафедрой "Электрические
машины и электропривод"
д.т.н., профессор

 Оськин С. В.

Члены комиссии:

 Цокур Д. С.
Харченко С. Н.



УТВЕРЖДАЮ

первый проректор ФГОУ ВО

«Кубанский ГАУ», профессор

С.М. Резниченко

AKT

об использовании результатов кандидатской диссертационной работы
аспиранта Харченко Сергея Николаевича в учебном процессе
ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет»
на факультете энергетики

Комиссия в составе:

председателя – декана факультета энергетики и электрификации к.т.н., доцента Шевченко А.А.; членов комиссии: заведующего кафедрой «Электрические машины и электропривод», д.т.н., профессора Оськина С. В.; профессора кафедры «Электрические машины и электропривод», д.т.н., профессора Стрижкова И.Г. составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы «Эффективные режимы работы сушильной установки пчелиной перги с рациональными параметрами комбинированного нагрева», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в учебном процессе на факультете энергетики.

Комиссия установила, что материалы диссертационной работы аспиранта Харченко С.Н. использованы при изучении дисциплин «Электротехнологические установки», «Электротехнологии в сельском хозяйстве», «Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве» на кафедре электрических машин и электропривода.

Комиссия считает, что материалы диссертации, включенные в рассматриваемые дисциплины повышают степень освоения профессиональных компетенций обучающимися по направлениям подготовки 35.03.04 и 35.06.04.

Председатель комиссии:  А.А. Шевченко

Члены комиссии: С.В. Оськин

И. Г. Стрижков

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) **RU** (11) **2 756 395** (13) **C1**

(51) МПК

[F26B 9/06 \(2006.01\)](#)

[F26B 5/02 \(2006.01\)](#)

[F26B 7/00 \(2006.01\)](#)

(52) СПК

[F26B 9/06 \(2021.08\)](#)

[F26B 5/02 \(2021.08\)](#)

[F26B 7/00 \(2021.08\)](#)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

Статус: действует (последнее изменение статуса: 10.10.2021)

Пошлина: Установленный срок для уплаты пошлины за 3 год: с 19.01.2022 по 18.01.2023. При уплате пошлины за 3 год в дополнительный 6-месячный срок с 19.01.2023 по 18.07.2023 размер пошлины увеличивается на 50%.

(21)(22) Заявка: [2021100928](#), 18.01.2021

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
18.01.2021

Дата регистрации:
30.09.2021

Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 18.01.2021

(45) Опубликовано: [30.09.2021](#) Бюл. № 28

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: RU 2578782 C1, 27.03.2016. RU 9735 U1, 16.05.1999. RU 2128050 C1, 27.03.1999. RU 61400 U1, 27.02.2007. RU 2391610 C1, 10.06.2010. CN 107894138 A, 10.04.2018.

Адрес для переписки:
350044, г. Краснодар, ул. Калинина, 13,
Кубанский ГАУ, отдел организации и
сопровождения научной деятельности

(72) Автор(ы):

Богатырев Николай Иванович (RU),
Оськин Сергей Владимирович (RU),
Харченко Сергей Николаевич (RU),
Цокур Дмитрий Сергеевич (RU),
Хаernasова Ангелина Искандеровна (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Кубанский государственный
аграрный университет имени И.Т.
Трубилина" (RU)