

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

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Краснодар – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина» (ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ)

Научный руководитель	Оськин Сергей Владимирович доктор технических наук, профессор
Официальные оппоненты:	Попов Виталий Матвеевич доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО Южно-Уральский ГАУ, кафедра «Энергообеспечение и автоматизация технологических процессов» (г. Челябинск); Каширин Дмитрий Евгеньевич доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева, кафедра электро-снабжения (г. Рязань)
Ведущая организация:	ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет» (г. Краснодар)

Защита состоится «16» июня 2022 года в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 220.038.08 при ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ по адресу: 350044, г. Краснодар, ул. Калинина, 13, Кубанский ГАУ, корпус факультета механизации, ауд. 345.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ <http://kubsau.ru/>.

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г., размещен на официальном сайте ВАК при Министерстве образования и науки России <https://vak.minobrnauki.gov.ru> и на сайте ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ <http://kubsau.ru/>

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор
Фролов Владимир Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. 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 его полезные свойства, что важно для перги и пыльцы богатых витаминами и микроэлементами.

Интенсифицировать процесс сушки гранулированной пчелиной перги можно путём комбинации конвективного и инфракрасного нагревов. Эффективные режимы работы таких установок и рациональные параметры комбинированного нагрева до сих пор исследуются.

Работа выполнена по плану 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 учё-

ные как: Коссович П. С., Лебедев А. В., Горячкин В. Г., Кирпичёв М. В., Лыков А. В., Гинзбург А. С. и др.

В настоящий момент вопросам развития сушильных установок и их внедрению на предприятиях АПК посвятили научные труды: 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. Большой вклад в развитие установок облегчающих труд пчеловодов, в том числе сушилок для перги и перговых сотов 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, 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.

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

Целью работы является 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.

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

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.

Научная новизна работы.

1. Математические модели процессов тепло- и влагопереноса протекающие при комбинированном нагреве внутри сушильной установки.

2. Зависимости теплофизических характеристик пчелиной перги от параметров и режимов работы комбинированного нагрева.

3. Эффективные режимы работы сушильной установки гранулированной пчелиной перги и параметры комбинированного нагрева в ней.

4. Основные физические параметры слоя гранул пчелиной перги и его сорбционные свойства.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается:

- в математических моделях процессов тепло- и влагопереноса протекающих при комбинированном нагреве и позволяющих описать временные изменения температуры и влажности продукта внутри сушильной камеры;

- в полученных зависимостях 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;

- в обоснованных эффективных режимах работы и рациональных параметрах сушильной установки пчелиной перги для повышения качества продукта и сокращения времени технологического процесса;

- в разработанном алгоритме и программе управления для контроллера, а также принципиальной электрической схеме управления сушильной установкой гранул пчелиной перги с комбинированным нагревом, которые позволяют управлять установкой в автоматическом режиме;

- в регрессионной зависимости равновесного влагосодержания в перге от относительной влажности окружающего её воздуха в виде изотермы сорбции влаги для адекватного моделирования;

- в методике определения характеристик пористых продуктов позволяющей 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 диссертацион-

ной 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».

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.

Публикации результатов работы. Основное содержание диссертации отражено в 9 печатных работах, в том числе: 3 статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК России, 2 статьи в международной базе данных Scopus. По теме диссертационного исследования получен патент РФ на изобретение.

Объём и структура работы. Диссертация содержит введение, 3 главы, заключение, список литературы, включающий 104 наименования, приложения. Текст диссертации изложен на 128 страницах машинописного текста, включая 10 страниц приложений, содержит 59 рисунков и 8 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрывается актуальность исследований, приведены цель работы, научная новизна, практическая значимость, и представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ способов сушки пчелиной перги, оборудования для ее осуществления, а также современных исследований в этой области. Определено, что наиболее подходящим для сушки гранулированной пчелиной перги, с позиции сохранности ее полезных свойств, является конвективный способ. Ключевые проблемы конвективной сушки такие как длительность и высокие энергозатраты требуют поиска способов интенсификации процесса. Их определение невозможно без получения математических моделей процессов тепло- и влагопереноса протекающих в сушильной камере и учитывающих сорбционные свойства исследуемого продукта. Отсутствие таковых моделей, а также недостаточная изученность комбинации конвективного и инфракрасного нагревов для сушки пчелиной перги привело к получению научной гипотезы: возможна разработка сушильной установки пчелиной перги с эффективными режимами работы и рациональными параметрами сушки, путем применения комбинированного нагрева и

использования современного ПО для исследования и моделирования внутренних процессов тепло- и влагопереноса.

Сформулирована цель работы и задачи исследования.

Во второй главе представлены теоретические исследования и математическое моделирование процессов тепло- и влагопереноса внутри сушильной камеры. Основное уравнение движения тепловых потоков было реализовано с помощью интерфейса «Heat Transfer in Fluids» в ПО Comsol Multiphysics:

$$\rho \cdot c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho \cdot c_p \cdot u \cdot \nabla T + \nabla q = \sum Q_h, \quad (1)$$

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.

Транспорт влаги был описан следующим уравнением в интерфейсе «Transport in Diluted Species»:

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \nabla \cdot (-D_i \nabla c_i) + u \cdot \nabla c_i = 0, \quad (2)$$

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

Для моделирования потоков сушильного агента использовались уравнения Навье–Стокса для ламинарного течения сжимаемой жидкости. Предполагалось, что в перге влага содержится в виде пара и воды, причём соблюдается условие:

$$s_{ж} + s_{п} = 1, \quad (3)$$

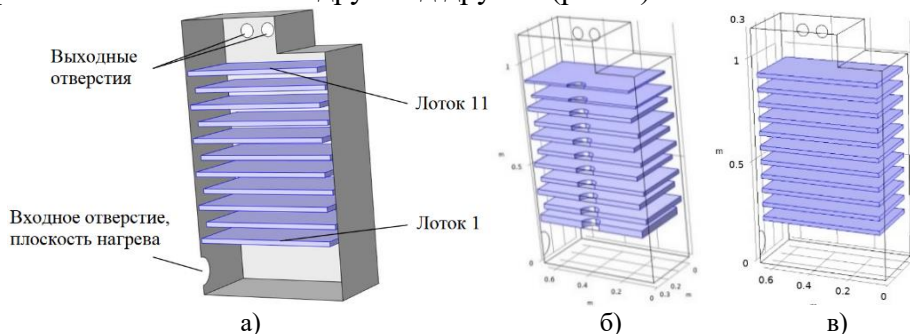
где $s_{ж}$ – коэффициент насыщения пор перги водой; $s_{п}$ – коэффициент насыщения пор перги паром.

Коэффициент насыщения пор перги водой определялся по известной формуле:

$$s_{ж} = \frac{c_{ж} M_{ж}}{\rho_{ж} \varepsilon}, \quad (4)$$

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 лотках (для данного случая была принята равной 0,5).

Рассматриваемая при моделировании геометрическая модель состояла из полностью теплоизолированного корпуса и лотков с пергой (рис. 1). Решение уравнений (1) и (2) было реализовано для различных геометрических постановок: при расположении лотков с продуктом зигзагообразно (лотки показаны синим цветом); в той же постановке, но ещё с наличием отверстий в лотках; со стандартным расположением лотков друг под другом (рис. 1).



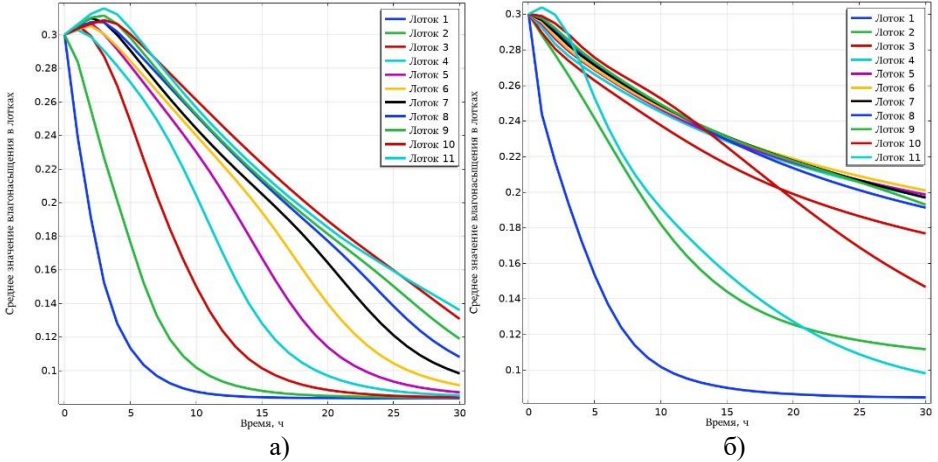
а) геометрическая модель с зигзагообразным расположением лотков, б) то же, но с отверстиями в лотках, в) с размещением лотков строго друг под другом

Рисунок 1 – Изображения вариантов геометрических моделей исследуемого объекта

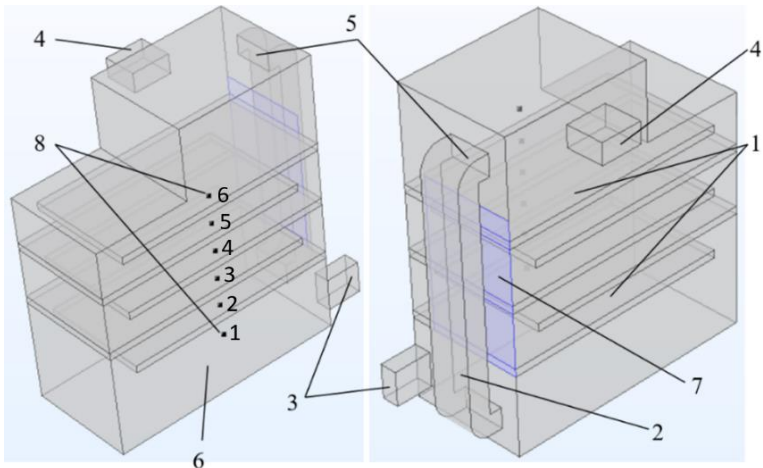
В результате моделирования сделаны следующие выводы. Наличие зигзагообразного канала ускоряет процесс сушки по сравнению с вариантом размещения лотков строго друг под другом, но при этом сохраняется существенная неравномерность распределения влаги между нижними и верхними лотками (рис. 2).

Наличие отверстий в лотках увеличивает равномерность сушки, но при этом снижается объём высушиваемого продукта. Представленные результаты моделирования не учитывают сорбционные свойства продукта, а также проницаемость слоя гранул пчелиной перги агентом сушки (воздухом), но позволяют сделать выводы о следующих способах интенсификации: формирование лотками с пергой зигзагообразного канала; необходимости создания системы рекуперации сушильного агента для повышения равномерности сушки. С учетом сделанных выводов была разработана геометрическая модель модернизированной сушильной камеры для дальнейшего описания и разработки математической модели физических

процессов, учитывающей проницаемость слоя пчелиной перги, изо-терму сорбции влаги и комбинацию конвективного и инфракрасно-го нагревов (рис. 3).



а) при зигзагообразном канале, б) при расположении лотков друг под другом
 Рисунок 2 – Графики изменения среднего значения влагосодержания $S_{Ж}$ в лотках с пергой во времени



1 – перга в лотках (их нумерация производится снизу-вверх), 2 – трубка системы 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 – контрольные точки для измерения температуры и влажности

Рисунок 3 – Изображение геометрической модели модернизированной сушильной камеры

Для моделирования процессов тепло- и влагопереноса были приняты следующие допущения и ограничения: для сокращения времени расчёта модели рассматривается только половина установки; теплопроводностью металлических конструкций пренебрегаем; все внешние поверхности представлены в виде тонких стенок со свойствами теплоизоляционного материала, а передача тепла во внешнюю среду через стенки будет описана с помощью соответствующих граничных условий; в перге влага содержится в виде пара и воды; удаление влаги из перги осуществляется на границе раздела фаз между областью занятой пергой и воздушной областью; перга представлена в виде пористого тела, поры которого образованы гранулами продукта; капиллярным эффектом в перге, пренебрегаем ввиду относительно больших пор, образуемых гранулами продукта; влага в перге удерживается на её поверхности с помощью адсорбции.

Перенос влаги в перге и воздухе можно описать следующими системами уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial w(\phi)}{\partial t} + \rho_{BB} u_{BO3} \nabla \omega_{II} + \nabla g_{III} + u_{Ж} \nabla \rho_{Ж} = 0 \\ \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_B \rho_{BB}) + \nabla (\rho_{BB} \cdot u_{BO3}) = 0 \\ \frac{\rho_{BB}}{\varepsilon_B} \left(\frac{\partial u_{BO3}}{\partial t} + (u_{BO3} \cdot \nabla) \frac{u_{BO3}}{\varepsilon_B} \right) = \\ = -\nabla p + \nabla \left(\frac{\mu_{BB}}{\varepsilon_B} \left((\nabla u_{BO3} + (\nabla u_{BO3})^T) - \frac{2}{3} (\nabla u_{BO3}) I \right) \right) - \left(\frac{\mu_{BB}}{K_{OB} K} \right) u_{BO3} + \rho_{BB} g \end{array} \right. , (5)$$

где ϕ – относительная влажность воздуха, отн. ед.; ε_B – пористость слоя гранул пчелиной перги, отн. ед.; $\rho_{Ж}$ – плотность воды, кг/м³; w – влагосодержание в слое гранул пчелиной перги, кг/м³; ω_{II} – массовая доля паров во влажном воздухе; g_{III} – диффузионный поток пара в перге, кг/(м²·с); $u_{Ж}$ – скорость перемещения свободной влаги в перге, м/с; K – проницаемость слоя гранул пчелиной перги, м²; K_{OB} – относительная проницаемость слоя гранул пчелиной перги паром, м².

$$\left\{ \begin{array}{l}
M_{II} \rho_{BB} \frac{\partial \left(\frac{c_{II}}{\rho_{BB}} \right)}{\partial t} + M_{II} \rho_{BB} u_{BO3} \cdot \nabla \left(\frac{c_{II}}{\rho_{BB}} \right) + \nabla g_D = G \\
\frac{\partial \rho_{BB}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_{BB} u_{BO3}) = 0 \\
\rho_{BB} \frac{\partial u_{BO3}}{\partial t} + \rho_{BB} u_{BO3} \nabla u_{BO3} = \\
= -\nabla p + \nabla \left((\mu_{BB} + \mu_T) \left(\nabla u_{BO3} + (\nabla u_{BO3})^T - \frac{2}{3} (\mu_{BB} + \mu_T) (\nabla u_{BO3}) I \right) \right) + \rho_{BB} g \\
u^+ = y^+ \text{ при } y^+ \leq y^* \\
u^+ = y^* + \frac{1 - \sqrt{1 + 4\kappa^2 (y^+ - y^*)^2}}{2\kappa^2 (y^+ - y^*)^2} + \\
+ \frac{1}{\kappa} \ln(\sqrt{1 + 4\kappa^2 (y^+ - y^*)^2} + 2\kappa(y^+ - y^*)) \text{ при } y^+ > y^* \\
y^* = B - \frac{1}{\kappa} (\ln(4\kappa) - 1) \\
Re = \frac{u_{BO3} y}{\nu_{BO3}} = u^+ y^+ \\
\mu_T = 0 \text{ при } y^+ \leq y^* \\
\mu_T = \mu_{BB} \left(\frac{-1 + \sqrt{1 + 4\kappa^2 (y^+ - y^*)^2}}{2} \right) \text{ при } y^+ > y^*
\end{array} \right. , (6)$$

где ρ_{BB} – плотность влажного воздуха, кг/м³; u_{BO3} – скорость воздуха, м/с; M_{II} – молярная масса водяного пара, кг/моль; c_{II} – концентрация водяного пара, моль/м³; G – источник (поглотитель) влаги, кг/(м³·с); g_D – диффузионный поток пара, кг/(м²·с); 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.

Согласно (5), чтобы определить транспорт влаги в перге необходимо знать зависимость ее влагосодержания w от относительной влажности окружающего воздуха ϕ или так называемую изотерму сорбции влаги, которая была определена экспериментально (рис. 4). Как видно из рисунка изотерма сорбции влаги в перге может быть аппроксимирована полиномиальной зависимостью третьей степени с достаточно высокой точностью (коэффициент детерминации составил $R^2 = 0,9928$).

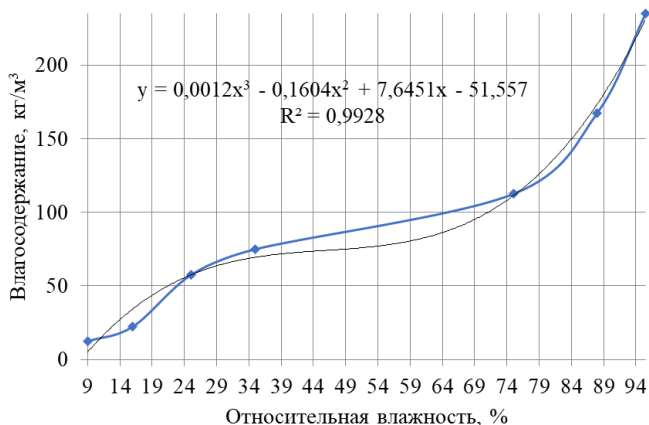


Рисунок 4 – Изображение графика изотермы сорбции влаги пчелиной перги в гранулах

Тепловые процессы, протекающие в сушильной камере, можно описать следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} \rho_{\text{ВВ}} C_{\text{ВВ}} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_{\text{ВВ}} C_{\text{ВВ}} u_{\text{ВОЗ}} \nabla T + \nabla q_{\text{В}} = Q + Q_{\text{ЭВП}} \\ C_{\text{Э}} \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho_{\text{ВВ}} C_{\text{ВВ}} u_{\text{ВОЗ}} + \rho_{\text{Ж}} C_{\text{Ж}} u_{\text{Ж}}) \nabla T + \nabla q_{\text{П}} = Q_{\text{ЭП}} + Q_{\text{ИСП}} \end{cases}, \quad (7)$$

где $C_{\text{ВВ}}$ – теплоёмкость влажного воздуха, Дж/(кг·°С); $q_{\text{В}}$ – плотность теплового потока в воздушной части сушилки, Вт/м²; Q – источник теплоты, Вт/м³; $Q_{\text{ЭВП}}$ – объёмная плотность потока энтальпии вызванного диффузией водяного пара, Вт/м³; $C_{\text{Ж}}$ – теплоёмкость воды, Дж/(кг·°С); $q_{\text{П}}$ – плотность теплового потока в перге, Вт/м²; $C_{\text{Э}}$ – эффективная объёмная теплоёмкость, Дж/(м³·°С);

$Q_{исп}$ – объёмная плотность теплового потока при испарении, Вт/м³; $Q_{эл}$ – объёмная плотность потока энтальпии вызванного диффузией водяного пара в перге, Вт/м³.

Пористость ε и проницаемость K слоя гранул пчелиной перги были определены по следующей методике: получение сканирования профиля исследуемого материала и его конвертация в монохромный вид; подсчёт площади, занятой цветом, который соответствует порам и расчёт пористости ε , как соотношения найденной площади к площади всего изображения; на основе полученного изображения разработка в ПО Comsol Multiphysics геометрической модели, соответствующей сечению установки с профилем пористого материала, высушиваемого в нём; задание уравнений гидродинамики (в данном случае использовались уравнения Навье-Стокса для течения в малых каналах), а также начальных и граничных условий, которые наиболее соответствуют рассматриваемой задаче и их расчет в ПО Comsol Multiphysics; определение проницаемости по результатам расчёта согласно известной формуле:

$$K = \frac{u_{\phi} \cdot \mu_B \cdot L}{\Delta p} \quad (8)$$

где u_{ϕ} – скорость фильтрации воздуха через слой перговых гранул, м/с; μ_B – динамическая вязкость воздуха, Па·с; L – характерный размер фильтрации, м; Δp – перепад давлений, Па.

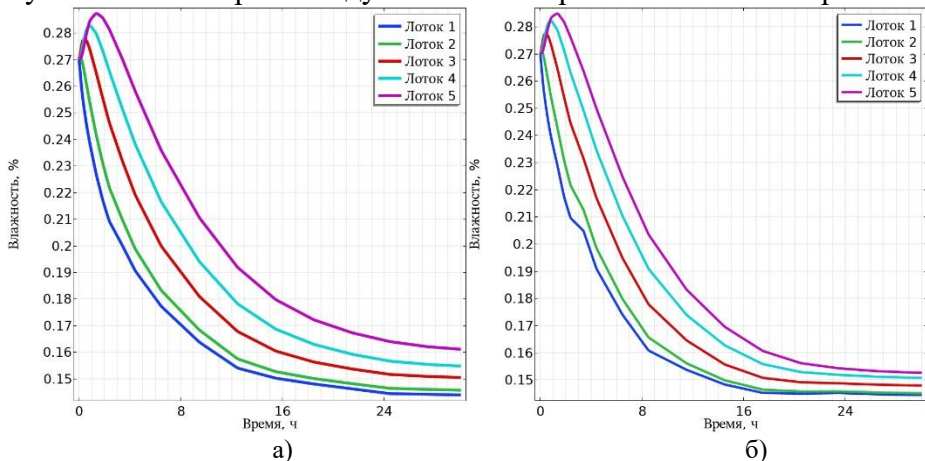
Пористость слоя гранул пчелиной перги составила $\varepsilon = 0,35$. Получены следующие значения проницаемости K : для первого лотка – $6,1185 \cdot 10^{-9}$ м², для второго – $9,2694 \cdot 10^{-9}$ м², для третьего – $9,0196 \cdot 10^{-9}$ м², для четвертого – $9,2758 \cdot 10^{-9}$ м², для пятого – $9,5385 \cdot 10^{-9}$ м².

Реализация моделей тепло- и влагопереноса в ПО Comsol Multiphysics была осуществлена с помощью интерфейсов: Heat Transfer in Moist Air в котором были заданы граничные условия, определяющие конвективный тепловой поток от внешних стенок сушильной камеры наружу, а также мощности нагревателей; Turbulent Flow в котором были описаны гидродинамические процессы и заданы граничные условия на входе и выходе из сушильной установки, а также на стенках камеры; Moisture Transport in Air в котором были заданы свойства влажного воздуха и найденные параметры слоя гра-

нул пчелиной перги (пористость ε и проницаемость K), ее сорбционные свойства.

Итогом компьютерной обработки полученных моделей тепло- и влагопереноса стали поля распределений температуры, влажности, скоростей воздуха и давлений внутри сушильной камеры. Важной особенностью моделирования было ограничение температуры перги в лотках – не более 40-41 °С, чтобы сохранить ее полезные свойства.

Были рассмотрены варианты конвективного и комбинированного нагревов. Как видно из рисунка 5 комбинация конвективного и ИК-нагрева позволяет сократить время сушки пчелиной перги в 1,7 раза, уменьшить разность значений относительной влажности гранул пчелиной перги между нижним и верхним лотками в 2 раза.



а) при конвективном способе, б) при комбинированном способе

Рисунок 5 – Графики изменения среднего значения влажности перги в каждом из лотков с продуктом в течении процесса сушки

В ходе моделирования были установлены эффективные режимы работы сушильной установки объемом 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. Удельные затраты энергии при конвективном нагреве составили 0,310 кВт·ч/кг, а при комбинированном варианте - 0,198 кВт·ч/кг.

Результаты моделирования показали, что при конвективном способе над поверхностью верхнего лотка создаётся область, в которой застаивается влага и наблюдаются одни из самых низких значений температур (рис. 6).

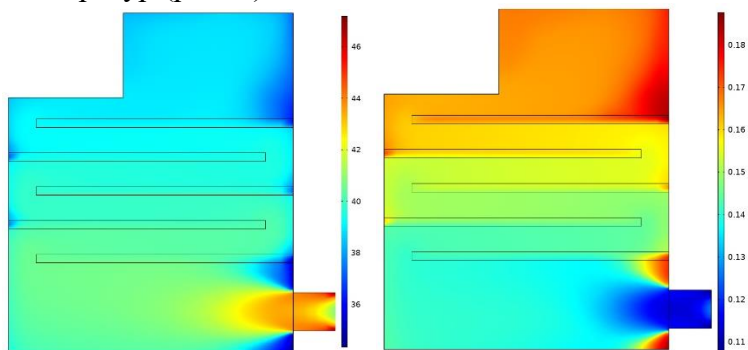


Рисунок 6 – Изображение полей распределения температуры (слева в °С) и влажности (справа в отн. ед.) внутри сушильной установки при конвективном нагреве через 20 часов работы

Добавление ИК-нагревателя решает эту проблему создавая более равномерный градиент влажности и температур внутри установки (рис. 7).

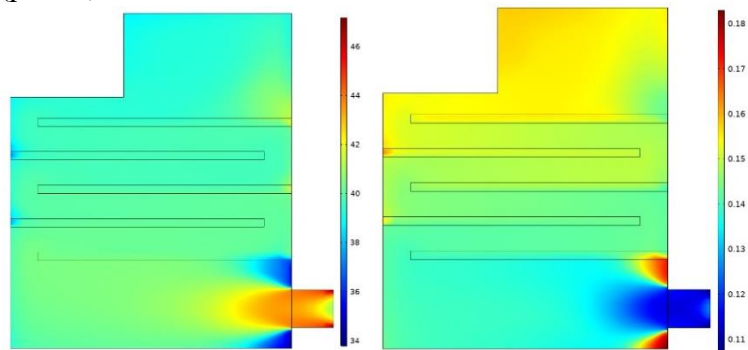
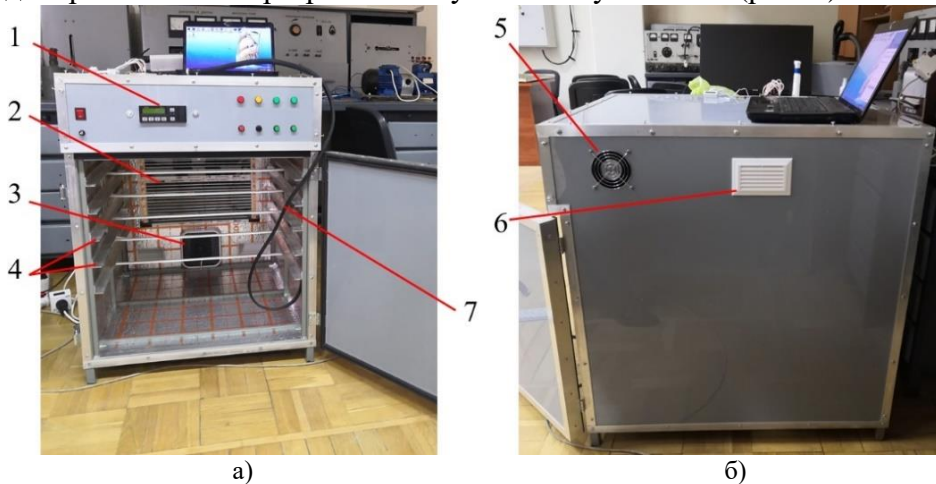


Рисунок 7 – Изображение полей распределения температуры (слева в °С) и влажности (справа в отн. ед.) внутри сушильной установки при комбинированном нагреве через 20 часов работы

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований. В соответствии с результатами компьютерного моделирования была разработана сушильная установка (рис. 8).



а) вид спереди, б) вид сбоку

1 – программируемое реле, 2 – ИК-нагреватель, 3 – электрокалорифер, 4 – опоры для лотков, 5 – вентилятор охлаждения САУ, 6 – выходное отверстие, 7 – кабель для подключения датчиков расположенных в одном из лотков

Рисунок 8 – Внешний вид сушильной установки

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. 9. Все датчики температуры в количестве 12 шт. представляют собой термосопротивление с характеристикой 50М. Из них 5 были установлены в одном из лотков сушильной камеры для контроля температуры слоя перги, 1 на поверхности ИК-нагревателя для регулирования его температуры, оставшиеся 6 датчиков были установлены в контрольных точках совпадающих с точками в геометрической модели на рис. 3. В качестве датчиков влажности использовалось 3 аналоговых датчика НІН 4000, которые были подключены к микроконтроллерной платформе Arduino Nano связанной с ноутбуком для передачи информации о значениях влажности.

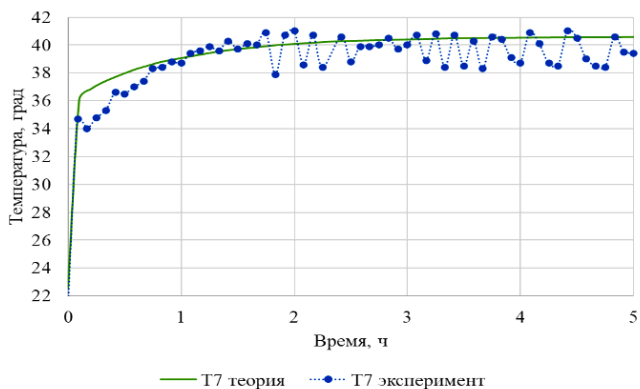


Рисунок 10 – Графики изменения температуры воздуха во времени в контрольной точке 1 показанной на рис. 3

При сопоставлении теоретических и экспериментальных данных в других точках значения R^2 превышали значение 0,8, а значения A не превысили 6%, что говорит также о хорошем соответствии теоретических экспериментальным данным. Графики изменения влажности сушильного агента в течении сушки в контрольных точках показаны на рисунке 11.

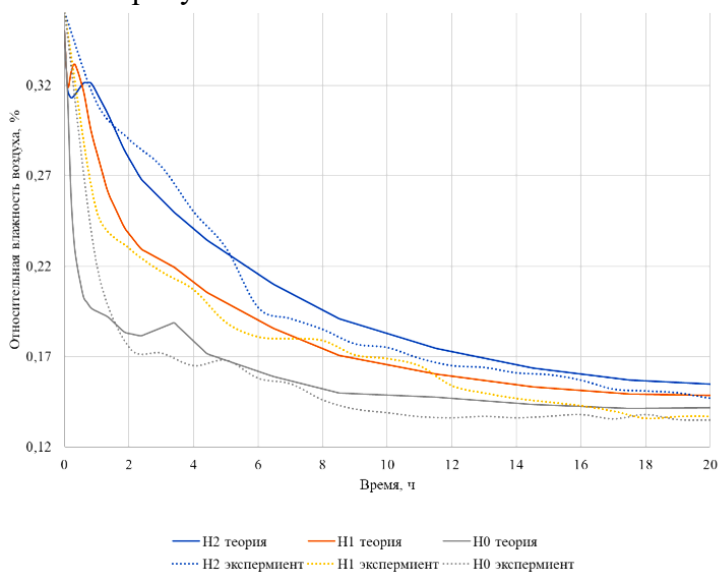


Рисунок 11 – Графики изменения влажности воздуха во времени в контрольных точках

Относительная влажность гранул пчелиной перги за 20 часов сушки упала до 15%. Подтверждаются 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. Удельные затраты энергии на сушку перги при комбинированном нагреве составили 0,222 кВт·ч/кг.

Произведен расчет экономической эффективности внедрения модернизированной сушильной установки пчелиной перги с рациональными параметрами комбинированного нагрева на пасике 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

Итоги выполненного исследования

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 $0,175 \text{ м}^2$.

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 $0,222 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{кг}$.

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 МВ110, 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.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ

- в изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science

1. Kharchenko S. N. Modeling of bee-bread drying process / S. N. Kharchenko, S. V. Oskin, D. S. Tsokur // Engineering for Rural Development. – 2020. – pp. 445–449.

2. Kharchenko S. N. Using comsol multiphysics in study of bee-bread drying modes / S. N. Kharchenko, S. V. Oskin, D. S. Tsokur // Engineering for Rural Development – 2021. – pp. 611–616.

- в изданиях, рекомендованных ВАК:

3. Харченко, С. Н. Определение пористости и проницаемости засыпки из гранул перги для моделирования процессов её сушки / С.Н. Харченко // Сельский механизатор. - 2021. – № 12. – С. 20-21.

4. Харченко, С. Н. Установка для сушки пчелиной перги / С. Н. Харченко, С. В. Оськин, Д. С. Цокур, Д. М. Таранов // Сельский механизатор. – 2021. – №6. – С. 20-21.

5. Харченко, С. Н. Эффективный процесс сушки пчелиной перги / С. Н. Харченко, С. В. Оськин, Д. С. Цокур, А. П. Волошин // Сельский механизатор. – 2020. – № 5–6. – С. 28–29.

- в прочих изданиях:

6. Пат. 2756395 Российская Федерация, МПК F26В 9/06, F26В 5/02, F26В 7/00. Установка для комбинированной сушки перги / Н. И. Богатырёв, С. В. Оськин, С. Н. Харченко, Д. С. Цокур, А. И. Харernasова; 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.

7. 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.

8. Харченко, С. Н. Моделирование технологического процесса сушки перги / С. Н. Харченко, С. В. Оськин // 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.

9. Харченко, С. Н. Приоритетные направления развития интеграционных и кооперационных связей в агроэкономике / С. Н. Харченко, Р. А. Хатит // В сборнике: Экономика и управление в условиях современной России. Материалы всероссийской научно-практической конференции. – 2018. – С. 308-310.

Подписано к печати
Бумага офсетная
Уч.-изд. л. 1
Тираж 100 экз.

Формат 60×84 1/16
Офсетная печать
Заказ № 33

Отпечатано в типографии ООО «Крон»
350004, г. Краснодар, ул. Алма-Атинская, 99