

На правах рукописи



ГУЛЕВСКИЙ Вячеслав Анатольевич

**НОРМАЛИЗАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНЫХ
ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ ПТИЦЕВОДЧЕСКИХ
ПОМЕЩЕНИЙ ПУТЕМ ОБРАБОТКИ ВОЗДУХА
ПЛАСТИНЧАТЫМИ ТЕПЛООБМЕННИКАМИ**

Специальность 05.20.01 – Технологии и средства механизации
сельского хозяйства

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Воронеж – 2015

Работа выполнена на кафедре высшей математики и теоретической механики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I» (ФГБОУ ВПО «ВГАУ»).

Научный консультант доктор технических наук, профессор
Шацкий Владимир Павлович.

Официальные оппоненты: **Завражнов Анатолий Иванович**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Мичуринский государственный аграрный университет», главный научный сотрудник;
Гриднев Павел Иванович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт механизации животноводства», заместитель директора;
Кузнецов Сергей Николаевич, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Воронежский государственный архитектурно-строительный университет», профессор кафедры теплогазоснабжения и нефтегазового дела.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Институт инженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства».

Защита состоится 28 мая 2015 г. в 13 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 220.010.04, созданного на базе ФГБОУ ВПО «ВГАУ», по адресу: 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, д. 13, учебный корпус агроинженерного факультета (корпус № 3), аудитория 319.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «ВГАУ» и на сайте www.vsau.ru («Информация о деятельности диссертационных советов» – «Защиты» – «Д 220.010.04»), а также по ссылке: <http://ds.vsau.ru/?p=1220>.

Автореферат разослан 31 марта 2015 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета Д 220.010.04



Афоничев Дмитрий Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Современные технологии выращивания и содержания сельскохозяйственной птицы предусматривают ее содержание в специализированных закрытых помещениях. Переход на содержание птицы в клеточных батареях объясняется стремлением сельхозпроизводителя максимально эффективно использовать каждый кубический метр полезного пространства. Данной проблеме посвящены труды таких известных ученых, как Бабаханов Ю.М., Баланин В.И., Битколов Н.З., Бодров В.И., Грабауров В.А., Гриднев П.И., Завражнов А.И., Золотарев М.П., Имангулов Ш.И., Маилян Э.Н., Плященко С.И. и др.

В подобных условиях разведения сельскохозяйственной птицы крайне актуальной является задача непрерывного соблюдения всех технологических и зоотехнических параметров при ее содержании и выращивании, наиболее значимыми из которых являются качество кормов, селекционная работа и состояние воздушной среды в птицеводческом помещении.

Последний фактор, как известно, во многом определяет состояние здоровья птицы, а также непосредственно сказывается на ее продуктивности. К основным параметрам воздушной среды, которые оказывают влияние на птицу, относят: температуру и влажность воздуха, его запыленность и скорость движения. Известно, что продуктивность птицы на 20-30% определяется состоянием воздушной среды помещения.

Существующие в птичниках системы вентиляции не способны круглогодично поддерживать в помещении необходимые параметры воздушной среды. В летний период это объясняется значительными теплопритоками, с которыми вентиляционная система справится не в состоянии, а зимой подаваемый в помещение воздух требует предварительного подогрева, что обуславливает необходимость в дополнительных тепловых установках.

В этой связи утверждена приказом №129 от 6 марта 2013 г. «Отраслевая программа развития птицеводства в РФ», которая направлена на создание условий, способствующих обеспечению продовольственной безопасности Российской Федерации. Согласно этой программе главными направлениями в обеспечении прироста производства птицеводческой продукции с учетом максимально используемых внутренних резервов развития отрасли будут являться: обновление производственной базы птицеводческих организаций, строительство новых предприятий, проведение реконструкции и модернизации действующих предприятий; реализация инновационных ресурсосберегающих технологий и научных разработок.

Руководствуясь дорожной картой данной программы и основываясь на современных тенденциях содержания птицы в европейских странах, необходимо отметить, что при строительстве и модернизации птичников определяющими критериями, предъявляемыми к вентиляционным системам, а также системам охлаждения и подогрева воздуха будут ресурсосбережение, экологическая безопасность.

Этим критериям полностью отвечают водоиспарительные охладители воздуха в жаркий период года и рекуператоры тепла – в холодный. Однако, их применение в настоящее время незначительно и ограничивается в первую очередь отсутствием достаточной теоретической базы по определению наиболее рациональных геометрических параметров и режимов их работы. Поэтому создание необходимой теоре-

тической базы, позволяющей определить параметры охладителей и рекуператоров, в комплексе с исследованиями, обуславливающими наиболее рациональные режимы их работы для нормализации температурно-влажностных параметров воздушной среды птицеводческих помещений с целью повышения продуктивности сельскохозяйственной птицы является актуальной проблемой.

Степень разработанности проблемы. Вопросами вентиляции производственных и животноводческих помещений занимались Бабаханов Ю.М., Бахарев В.А., Битколов Н.З., Бромлей М.Ф. Буянов В.И., Гримитлин А.М., Егиазаров А.Г., Иваненко В., Каменев П.Н., Крум Д., Кудрявцев Е.В., Кузнецов С.Н., Левыкин М., Мелькумов В.Н., Позин Г.М., Полосин И.И., Полушкин В.И., Робертс Б., Скрыпник А.И, Талиев В.Н., Трояновский В.Н., Шацкий В.П.

В работах этих авторов отмечается, что для гарантированного поддержания температурно-влажностных параметров воздушной среды птицеводческих помещений в течение года необходимо применять охлаждение и подогрев воздуха. Кондиционированию воздуха посвящены работы Архипова В.Г., Баркалова Б.В., Безручко А.С., Богословского В.Н., Заводова А., Кириллова Н.К., Кокорина О.Я., Крума Д., Пчелкина Ю.Н., Свистова В.В., Сидорова В.М.

В свою очередь проблемой обогрева птицы в холодный период года занимались Барановский Н.В., Бахарев В.А., Егиазаров А.Г., Раяк М.Б. и др.

Цель исследований – повышение продуктивности сельскохозяйственной птицы за счет улучшения температурно-влажностных параметров воздушной среды птицеводческого помещения путем включения в его систему вентиляции пластинчатых водоиспарительных охладителей воздуха в жаркий период года и рекуператоров тепла в холодное время и разработки их геометрических параметров и режимов их работы.

Для достижения поставленной цели с учетом сформулированной научной гипотезы предусмотрим решение следующих **задач исследования**:

1) обосновать выбор технических средств для нормализации температурно-влажностных параметров воздушной среды птицеводческих помещений в жаркое и холодное время года;

2) теоретически обосновать критерии эффективности работы пластинчатых теплообменников в птицеводческих помещениях;

3) определить необходимые физико-механические свойства капиллярно-пористого материала для водоиспарительных охладителей, обеспечивающими их эффективную работу;

4) разработать математическую модель энергетического баланса в водоиспарительных охладителях, отличающуюся учетом специфики испарительных свойств теплообменных пластин;

5) разработать математические модели процессов тепло–массопереноса в каналах испарительных насадок водоиспарительных охладителей и противоточных теплообменниках с учетом продольно–поперечной теплопроводности пластин; методы реализации предложенных моделей;

6) определить этапы исследований, приводящие к конкретным рекомендациям по конструированию указанных установок; условия, влияющие на эффективность их работы; на основании предложенных рекомендаций построить опытные и промышленные образцы охладительных установок и рекуператоров тепла;

7) определить перспективы практического использования теории на практике путем проведения оптимизации геометрических параметров и режимов работы охладителей и теплообменников; допустимые климатические пределы использования предложенных математических моделей на практике;

8) создать основополагающую базу практических рекомендаций и программных модулей для выбора систем нормализации температурно-влажностных параметров в птицеводческих помещениях, основанную на моделировании протекающих в них теплофизических процессов.

9) провести оценку эффективности работы предлагаемых теплообменников, а также экономический эффект от их применения в жаркое и холодное время года.

Для достижения поставленной цели нами была выдвинута **научная гипотеза** о возможности значительного улучшения состояния микроклимата птицеводческих помещений при использовании пластинчатых теплообменников, которые представляют собой в жаркое время года водоиспарительные охладители воздуха, а в зимнее – рекуператоры тепла.

Объект исследования: функционирование и режимы работы охладительных комплексов водоиспарительного принципа действия и пластинчатых рекуператоров тепла.

Предмет исследования: закономерности изменения температурно-влажностного состояния воздушной среды птицеводческих помещений; физические процессы, протекающие в каналах и основополагающих элементах пластинчатых охладителей и рекуператоров тепла, а также критерии эффективности заявленных устройств, необходимые для создания их оптимальных конструкций.

Методика исследований. Решение проблемы реализовано с применением методов теоретических и эмпирических исследований. При проведении лабораторных исследований и производственных испытаний использованы классические и частные методики с применением математического моделирования и математической статистики, а также современных приборов и вычислительной техники.

Научная новизна и практическая значимость:

- положения о количественной взаимосвязи температурно-влажностных параметров воздушной среды в птицеводческих помещениях с энергетическими характеристиками охладительных и теплогенерирующих комплексов;

- методы математического моделирования, основанные на краевых задачах для систем дифференциальных уравнений в частных производных параболического и эллиптического типов, алгоритмы численных реализаций построенных моделей;

- аргументы, доказывающие преимущество предлагаемых установок нормализации микроклимата; этапы исследований, приводящие к конкретным рекомендациям по конструированию указанных установок; условия, влияющие на эффективность их работы;

- факт постоянства температуры поверхностей пластин в испарительных насадках прямого принципа действия, что позволило вывести одномерную модель тепло-массопереноса; противоречие, заключающееся в снижении эффективности работы охладителей при увеличении глубины охлаждения свыше некоторого значения; факт снижения эффективности работы пластинчатых теплообменников при значительном увеличении теплопроводности пластин за счет продольной теплопередачи;

– модернизация моделей тепло-массопереноса в водоиспарительных охладителях и теплопереноса в противоточных пластинчатых теплообменниках, введением уравнения переноса тепла в пластинах; в качестве метода реализации полученных граничных задач предложен метод решения систем алгебраических конечно-разностных уравнений в объединенной области «каналы- пластины».

– расчетные формулы для определения температурно-влажностных параметров птицеводческих помещений при использовании водоиспарительных охладителей и рекуперативных теплообменников; математические модели и алгоритмы их реализации для выбора параметров и режимов работы охладителей и пластинчатых теплообменников. На основании предложенных рекомендаций построены опытные и промышленные образцы охладительных установок;

– перспективы практического использования теории на практике путем проведения оптимизации геометрических параметров и режимов работы охладителей и теплообменников; допустимые климатические пределы использования предложенных математических моделей на практике;

– система практических рекомендаций и программных модулей для выбора систем нормализации температурно-влажностных параметров в птицеводческих помещениях, основанная на моделировании протекающих в них теплофизических процессов;

– методические рекомендации и программы для ЭВМ, позволяющие определить геометрические параметры и режимы работы комплексов для нормализации микроклимата в птицеводческих помещениях, расчеты и рекомендации к производству водоиспарительных охладителей как прямого, так и косвенного принципа действия, а также предложения по дальнейшему совершенствованию конструкций пластинчатых теплообменников.

Результаты научных исследований представлены в завершенном виде.

Постановлением правительства Липецкой области № 485 от 30 апреля 2014, в рамках обновления производственной базы птицеводческих организаций с реализацией инновационных ресурсосберегающих технологий и научных разработок, указанные пластинчатые охладители и рекуператоры включены в государственную программу Липецкой области «Развитие сельского хозяйства».

Степень достоверности результатов, полученных при теоретических исследованиях, подтверждается данными лабораторных и производственных испытаний водоиспарительных пластинчатых охладителей и рекуператоров тепла.

Необходимая глубина анализа и достоверность выводов достигается применением общенаучных методов и приемов – монографического, аналитического, экономико-математического, статистического, графического.

Эмпирическая база исследования включает обработанные данные, полученные в результате проведения лабораторных экспериментов и опытно-производственных испытаний.

Сходимость теоретических и экспериментальных данных позволяет говорить об адекватности предложенных математических моделей и не противоречит фактам, известным из специальной литературы.

Диссертационная работа выполнена в соответствии с перспективным планом научно-исследовательской работы ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», утвержденного на заседании

научно-технического совета 15 декабря 2010 г., протокол № 5. Тема №4.2 «Инновационные направления совершенствования процессов и технических средств механизации производства продукции животноводства».

Апробация работы. Основные положения работы доложены и обсуждены на научных конференциях Воронежского государственного аграрного университета имени императора Петра I (2000 – 2014 г.г.), на международных научно-практических конференциях (Старый Оскол, 2004, 2011г., Москва, 2007), на воронежской зимней математической школе «Понтрягинские чтения» (Воронеж, 2007, 2010 г.), на международной молодежной научной конференции «Молодежь и XXI век» (Курск, 2010), на XIV международной научно-производственной конференции «Проблемы сельскохозяйственного производства на современном этапе и пути их решения» (Белгород, 2010 г.), на международном научно-техническом семинаре (Воронежская лесотехническая академия, 2010 г.), на XII международной молодежной научной конференции Севергеоэкотех. (Ухта, 2011 г.). Результаты работы включены в справочник инновационных разработок ВУЗов Российской Федерации. (Белгород, 2013г.), Международная открытая конференция «Современные проблемы анализа динамических систем. Приложения в технике и технологиях» (Воронежская государственная лесотехническая академия, 2014). В рамках выставки «Агросезон-2013», посвященной современной технике и технологиям в земледелии и животноводстве награжден золотой медалью за разработку проекта «Водоиспарительный охладитель воздуха».

Защищаемые положения:

– математическая модель энергетического баланса в водоиспарительных охладителях, основанная на аппроксимации табличных значений для плотности насыщенного пара, отличающаяся учетом специфики испарительных свойств теплообменных пластин;

– математические модели процессов тепло–массопереноса в каналах испарительных насадок водоиспарительных охладителей и противоточных теплообменниках с учетом продольно–поперечной теплопроводности пластин; методы реализации предложенных моделей;

– расчетные формулы для определения температурно–влажностных параметров птицеводческих помещений при использовании водоиспарительных охладителей и рекуперативных теплообменников;

– математические модели и алгоритмы их реализации для выбора параметров и режимов работы охладителей и пластинчатых теплообменников;

– система практических рекомендаций и программных модулей для выбора систем нормализации температурно–влажностных параметров в птицеводческих помещениях, основанная на моделировании протекающих в них теплофизических процессов;

– методические рекомендации и программы для ЭВМ, позволяющие определить геометрические параметры и режимы работы комплексов для нормализации микроклимата в птицеводческих помещениях, а также расчеты и рекомендации к производству водоиспарительных охладителей прямого принципа действия, а также предложения по дальнейшему совершенствованию конструкций пластинчатых теплообменников.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 35 научных работ, в том числе 15 работ размещено в изданиях, рекомендованных для опубликования результатов докторских диссертаций, 1 монография.

Структура и объём работы: диссертационная работа состоит из введения, 6 разделов, общих выводов, списка литературы и приложений. Она изложена на 327 страницах компьютерного текста. Список литературы включает 254 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит актуальность проблемы и доказывает возможность повышения продуктивности сельскохозяйственной птицы за счёт улучшения температурно-влажностных параметров воздушной среды птицеводческих помещений. Сформулированы цель и задачи исследований, приводятся объекты, методы исследования, показаны научная новизна положений, выносимых автором на защиту, и практическая ценность работы, отражены вопросы реализации и апробации полученных научных результатов, дана общая характеристика выполненных исследований. Решения отдельных частных задач по теме диссертационной работы выполнены автором при участии доктора технических наук, профессора, Шацкого В.П.

В первом разделе «Состояние микроклимата в стационарных объектах птицеводства. Его влияние на продуктивность и здоровье птицы» представлен аналитический обзор влияния температурно-влажностных параметров воздуха внутри птицеводческого помещения, а также его запыленности и загазованности на продуктивность и здоровье птицы. Отражены зависимости продуктивности птицы, потребления ею корма от указанных параметров воздушной среды. Вопросам, связанным с влиянием микроклимата на птицу посвящены труды Котова И.В., Маиляна Э., Маркова Ю.М., Марьенко Н., Мельника В.И., Плященко С.И., Прокопенко А.А., Самарина Г.Н., Самойлова Л., Селянского В.М., Скутаря И.Г., Трушина В.А.

Проведена оценка типичных теплопоступлений в птицеводческом помещении и представлен расчет теплового баланса, позволяющий численно определить теплопритоки в зависимости от типа помещения, количества и способа содержания птицы. При формировании теплового баланса за научную основу были приняты работы Бабаханова Ю.М., Бакластова А.М., Бахарева В.А., Бронфмана Л.И., Зайцева А.М., Егиазарова А.Г., Кочиша И.И. и др.

Далее приводится анализ различных способов и систем вентиляции, применяемых для нейтрализации указанных теплопритоков и поддержания в птичниках нормируемых температурно-влажностных показателей микроклимата. Данные исследования базируются на опыте следующих ученых: Бабаханов Ю.М., Бахарев В.А., Битколов Н.З., Бромлей М.Ф., Буянов В.И., Гримитлин А.М., Егиазаров А.Г., Иваненко В., Каменев П.Н., Крум Д., Кудрявцев Е.В., Левыкин М., Мелькумов В.Н., Позин Г.М., Полосин И.И., Полушкин В.И., Робертс Б., Скрыпник А.И., Талиев В.Н., Трояновский В.Н., Шацкий В.П.

В работах этих авторов отмечается, что для гарантированного поддержания температурно-влажностных параметров воздушной среды птицеводческих помещений в течение года необходимо применять охлаждение и подогрев воздуха.

Во втором разделе «Пути и средства улучшения температурно-влажностных параметров воздушной среды птицеводческих помещений» приведен обзор различных установок для тепловой обработки воздуха. Кондициониро-

ванию воздуха посвящены работы Архипова В.Г., Баркалова Б.В., Безручко А.С., Богословского В.Н., Заводова А., Кириллова Н.К., Кокорина О.Я., Крума Д., Пчелкина Ю.Н., Свистова В.В., Сидорова В.М. Предложен анализ различных систем для кондиционирования воздуха в жаркий период года. В частности, изучен передовой опыт фирмы БигДачмен, которая в последние годы активно внедряет на отечественный рынок систему охлаждения воздуха орошаемыми панелями.

На основании доказанных преимуществ пластинчатых водоиспарительных охладителей сделан вывод о перспективности их применения для охлаждения воздуха птицеводческих помещений.

Представлены исследования по конструированию и изготовлению материала для пластин подобных охладительных блоков, т.к. существовавшие до недавнего времени материалы не удовлетворяли предъявляемым требованиям из-за относительно низкой величины скорости капиллярного подъема и водопоглощения этих материалов (в большинстве случаев менее 18см за 30мин), а также недостаточной водостойкости материалов в условиях длительной автономной работы установки, выражающаяся или в вымывании ПАВ (пористый полиэтилен, мипласт, поровинил), или в биологическом разложении целлюлозы (Daramic, Hollingsworth & Vose), или в ухудшении капиллярных свойств материала из-за отложения в его порах солей жесткости и других загрязнений.

Анализ связи структуры и способа изготовления КПМ с его эксплуатационными характеристиками, проведенный в работах Дубового В.К., Свиридова Е.Б., показывает, что оптимальным является сочетание следующих параметров: 1) наличие системы тонких капилляров, 2) наличие значительного свободного объема, 3) «открытость» пор, 4) наличие развитой гидрофильной поверхности, 5) водостойкость, 6) возможность изготовления профилированной поверхности, 7) хорошие механические свойства, 8) экологически безопасная технология производства, 9) умеренная цена.

Эта сложнейшая задача была решена группой специалистов Санкт-Петербургской государственной лесотехнической академии (д.т.н. В.К. Дубовый), которые создали с использованием нанотехнологических приемов «Композиционный материал для специальной техники» (КМСТ) ТУ 5445-055-00281097-2008, обладающий именно такой структурой. На рис. 1 приведены микрофотографии пористого полиэтилена и КМСТ.

Специальные исследования показали исключительно высокий уровень капиллярно-пористых свойств КМСТ, сочетающихся с прекрасной водостойкостью.

В дальнейшем приводится тепловой баланс птицеводческого помещения, оборудованного пластинчатыми охладителями воздуха водоиспарительного принципа действия. Он однозначно показывает, что применение водоиспарительных охладителей воздуха может значительно снизить температуру внутри помещения, приводя ее к регламентированным значениям при этом значения скорости воздуха и кратность обмена воздуха остаются в пределах нормы (рис. 2).

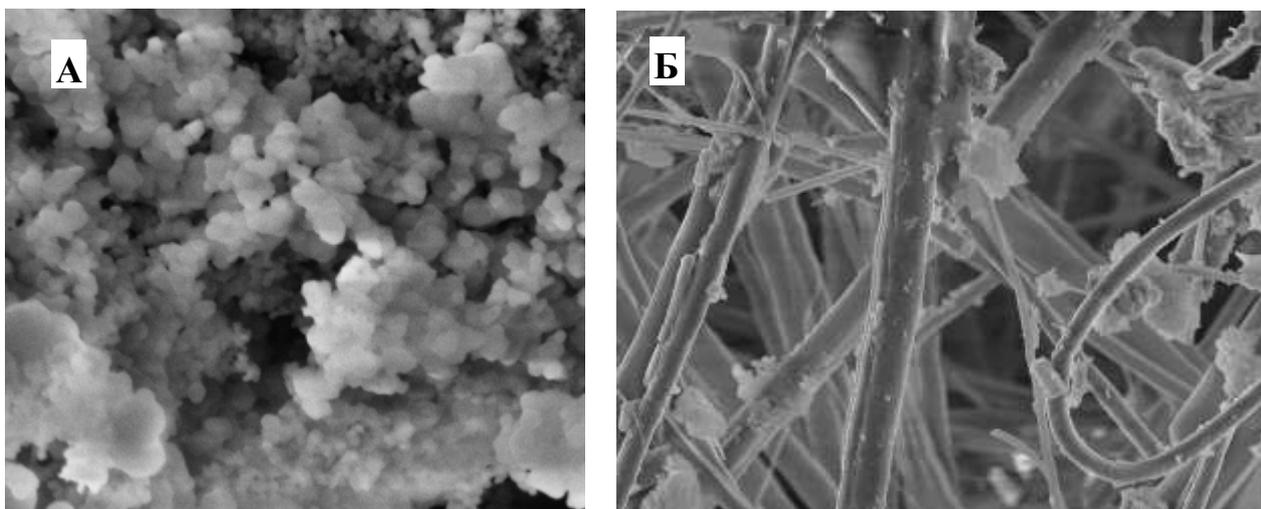


Рисунок 1. Микрофотографии: (А) КПМ зернистого строения, размер зерен 40-100 мкм (получен спеканием частиц сверхвысокомолекулярного полиэтилена) и (Б) бумагоподобного КПМ на основе микротонкого стекловолокна номинальным диаметром 0,25мкм.

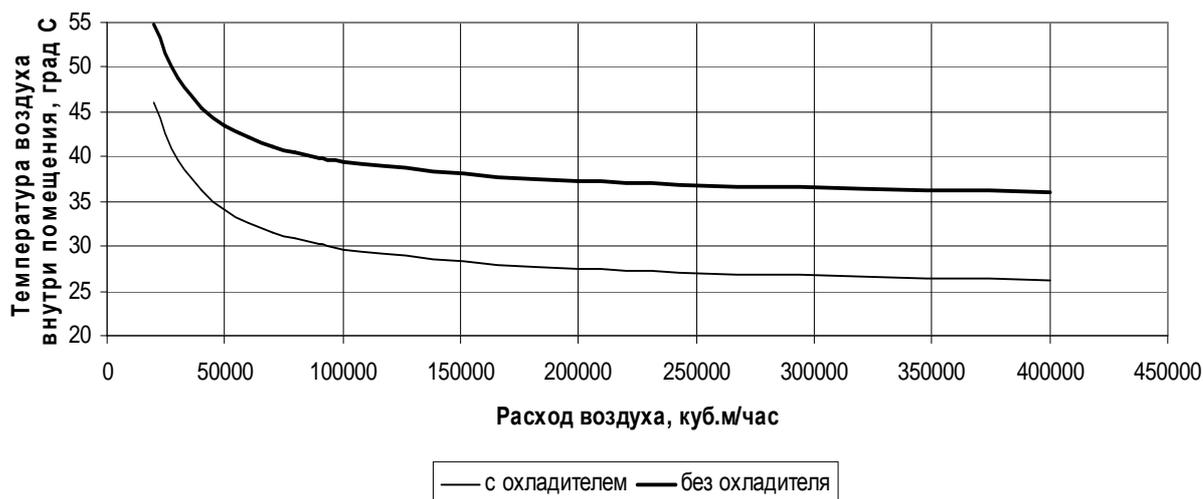


Рисунок 2. Зависимость температуры воздуха в помещении от производительности вентиляции при $t_n=35$ °С.

Пластинчатые охладители характеризуются высоким коэффициентом эффективности и способны насытить воздух влагой практически до 100%. Одновременно с этим они охлаждают обрабатываемый воздух до минимально возможной температуры. Другими словами, в этом случае будет достигнута максимальная глубина охлаждения.

Поступающий из охладителя в помещение влажный воздух во многом будет определять значения относительной влажности воздушной среды этого помещения. При содержании птицы эти значения жестко нормируются. Оптимальные границы относительной влажности лежат в пределах 60 – 70%. При возрастании значений относительной влажности воздуха в птичнике при высоких значениях температур может наблюдаться перегрев организма птицы.

Следовательно, при проектировании водоиспарительных охладителей необходимо строго учитывать его влияние на влажностный баланс птицеводческого помещения. Для количественной оценки относительной влажности воздуха в воздушной среде птицеводческого помещения при различных режимах работы охладителей приведен влажностный баланс воздушной среды птицеводческого помещения.

Из уравнения теплового баланса была определена температура воздуха внутри помещения при $t_n=30^{\circ}\text{C}$. При глубине охлаждения 12°C она составит $22,3^{\circ}\text{C}$. При таких значениях относительная влажность внутри помещения будет равна 83%.

Как видим, это значение выше нормы и, следовательно, при высоких температурах воздуха внутри помещения может произойти перегрев организма птицы.

Учтем, что данный расчет проводился для максимальной глубины охлаждения воздуха водоиспарительным блоком, следовательно, его относительная влажность на выходе из охладителя практически равна 100%.

Очевидно, что для снижения относительной влажности воздуха внутри птичника необходимо уменьшить относительную влажность воздуха на выходе из охладителя. Это, в свою очередь, повлечет снижение глубины охлаждения воздуха и уменьшит холодопроизводительность.

Как видно из этих рассуждений, при конструировании охладительных блоков необходимо стремиться к выбору наиболее рациональных режимов их работы, которые позволят при достаточной глубине охлаждения удерживать в рамках зооигиенических требований значения относительной влажности воздуха в помещении.

Далее приведены существующие способы и варианты обогрева птицеводческих помещений. Их анализ позволяет сделать вывод о рациональности использования рекуператоров тепла.

Известно, что в независимости от времени года и уличных температур для нормального содержания птицы необходима определенная смена загрязненного воздуха на чистый. Нормативные требования на этот счет устанавливают определенные значения кратности обмена. В холодный период года необходимо подавать $1\text{ м}^3/\text{ч}$ чистого воздуха на 1 кг живого веса птицы. К примеру, при содержании 12 000 кур со средней массой одной птицы 1,5 кг, необходимо обеспечить подачу свежего воздуха в количестве $12600\text{ м}^3/\text{ч}$. При этом выходящий из помещения воздух будет уносить с собой тепло. Несложный расчет показывает, что эти теплопотери могут достигать 100 кВт.

Эту энергию можно использовать для подогрева воздуха, подаваемого в помещение системой вентиляции. Для этой цели в настоящее время используют различные теплообменники. Передовой опыт европейских государств показывает, что наиболее рационально применение пластинчатых рекуператоров тепла, которое обычно выбрасывается из помещения вместе с удаляемым из него загрязненным воздухом. Подобные устройства весьма просты в эксплуатации и не требуют высокой квалификации обслуживающего их персонала. При работе они не используют энергию для подогрева подаваемого в помещение воздуха, т.к. это тепло отбирается у воздуха, выходящего из помещения и передается приточному воздуху через стенки рекуператора. Еще одним преимуществом рекуператоров является то, что с их помощью можно организовать равномерную подачу свежего воздуха по всему объему помещения и тем самым убрать застойные зоны с повышенной концентрацией вредных веществ. Более того, практика показывает, что без рекуператоров добиться

отсутствия застойных зон можно только с использованием различных и достаточно мощных, а значит и затратных, обогревателей.

В третьем разделе «Математическое моделирование теплофизических процессов в каналах теплообменников» предлагаются уравнения баланса тепла и влаги в каналах водоиспарительных охладителей, моделирование процессов тепло–массопереноса в каналах испарительной насадки прямого принципа действия, моделирование процессов тепло–массопереноса в каналах испарительной насадки косвенного принципа действия, моделирование процессов теплообмена в каналах пластинчатых теплообменников.

Математическая модель тепло–массопереноса в водоиспарительном канале сечения $H=2h$ (рис. 3) описывается известными дифференциальными уравнениями в частных производных параболического типа, описывающими перенос энергии и массы:

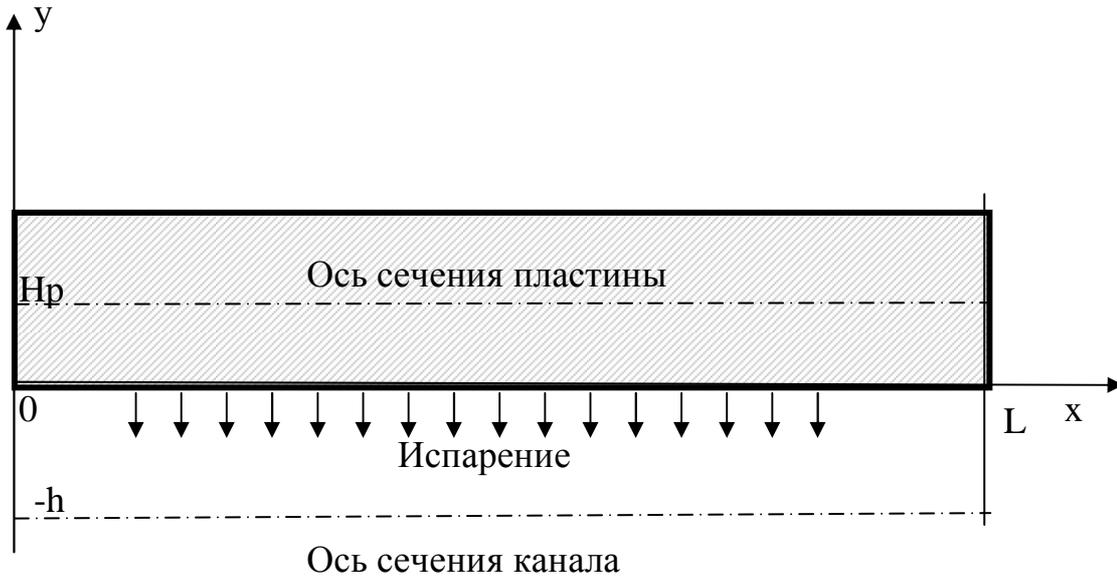


Рисунок 3. Фрагмент испарительной насадки

$$\rho \cdot V(x, y) \cdot C \cdot \frac{\partial t}{\partial x} = \lambda \frac{\partial^2 t}{\partial y^2}, \quad V(x, y) \cdot \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left(D \frac{\partial w}{\partial y} \right)$$

$w(x, y) = \phi(x, y) \cdot w_H(t)$, $w_H(t) = (0,0004212t^3 + 0,001831t^2 + 0,4195t + 4,727) \cdot 10^{-3}$, где V – скорость воздуха, м/с, которая определялась по формуле для ламинарного режима течения, учитывающей гидродинамический начальный участок.

В силу необходимости определения температуры поверхности пластины, мы добавляем к этим уравнениям уравнение распределения тепла в пластине, которое классифицируется как дифференциальное уравнение в частных производных второго порядка эллиптического типа:

$$\frac{\partial^2 T_p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_p}{\partial y^2} = 0, \quad x \in (0, L), \quad y \in (0, H_p),$$

Также добавляются условия непроницаемости на торцах пластины:

$$\left. \frac{\partial T_p}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad y \in (0, H_p), \quad \left. \frac{\partial T_p}{\partial x} \right|_{x=L} = 0, \quad y \in (0, H_p),$$

условия четности на оси симметрии канала и пластины:

$$\left. \frac{\partial t}{\partial y} \right|_{y=-h} = 0, \quad \left. \frac{\partial w}{\partial y} \right|_{y=-h} = 0, \quad \left. \frac{\partial \Gamma}{\partial y} \right|_{y=H_p} = 0, \quad x \in (0, L),$$

условия сопряжения: $t|_{y=0} = \text{Tr}|_{y=0}, \quad x \in (0, L).$

На поверхности пористой пластины

$$(\varepsilon R + C_{ж}(t_{пов} - t_{ж}))D \frac{\partial W}{\partial y} = \lambda_{пл} \frac{\partial \text{Tr}}{\partial y} - \lambda \frac{\partial t}{\partial y}, \quad y = 0, \quad x \in (0, L),$$

$$D = 10^{-5} \cdot 2,16 \cdot (1 + t/273)^{1,8}, \quad w|_{y=0} = w_n(t_{пов}) .$$

Система замыкается начальными условиями на входе в канал:

$$t|_{x=0} = t_{вх}, \quad \varphi|_{x=0} = \varphi_{вх} .$$

Для реализации данной модели предлагается следующий метод. Разобьем половину сечения канала испарительной насадки длиной L и шириной h соответственно на N_x и на N_y частей. Полученная сетка образует $2(N_x+1)(N_y+1)$ узлов, для которых мы запишем разностные аналоги входящих в модель соотношений.

Аналогично поступим с половиной сечения пластины испарительной насадки длиной L и шириной H_p . Узлы мы будем нумеровать целочисленным индексом $j = 0 \dots N_x$ вдоль канала и пластины и $i = 0 \dots N_y$ поперек канала и пластины. Таким образом, получаем $(N_x+1)(N_y+1)$ узлов сетки в пластине с неизвестной ее температурой и $(N_x+1)(N_y+1)$ узлов сетки в канале с неизвестными температурой и плотностью пара. Учитывая, что на входе в канал температура и плотностью пара заданы, получаем

$$3(N_x+1)(N_y+1) - 2N_y = 3N_x N_y + 3N_x + N_y + 3$$

неизвестных.

Величину шага по длине пластины обозначим M_x , а по сечению канала и пластины—соответственно M_y и M_{py} .

Первая группа конечно—разностных аналогов уравнений переноса в каналах имеет вид:

$$C_p V_{i,j} \frac{t_{i,j+1} - t_{i,j}}{M_x} = \lambda \frac{t_{i+2,j+1} - 2t_{i+1,j+1} + t_{i,j+1}}{M_y^2},$$

$$V_{i,j} \frac{w_{i,j+1} - w_{i,j}}{M_x} = D_{i,j} \frac{w_{i+2,j+1} - 2w_{i+1,j+1} + w_{i,j+1}}{M_y^2},$$

$j=1, \dots, N_x, i=1, \dots, N_y-2$, то есть $2 N_x(N_y-1) = 2 N_x N_y - 2 N_x$ уравнений.

Вторая группа конечно—разностных аналогов уравнений распределения тепла в пластине имеет вид:

$$\frac{\text{Tr}_{i+1,j} - 2\text{Tr}_{i,j} + \text{Tr}_{i-1,j}}{M_{py}^2} = \frac{\text{Tr}_{i,j+1} - 2\text{Tr}_{i,j} + \text{Tr}_{i,j-1}}{M_x^2}$$

$j=1, \dots, N_x-1, i=1, \dots, N_y-1$, то есть $(N_x-1)(N_y-1) = N_x N_y - N_x - N_y + 1$ уравнений.

Общее количество уравнений составило:

$$2 N_x N_y - 2 N_x + N_x N_y - N_x - N_y + 1 = 3 N_x N_y - 3 N_x - N_y + 1.$$

Третья группа конечно-разностных аналогов условий четности на осях симметрии канала и пластины имеют вид:

$$\begin{aligned} t_{0,j} &= t_{1,j} \quad j=1 \dots N_x \\ w_{0,j} &= w_{1,j} \quad j=1 \dots N_x \\ \text{Tr}_{N,j} &= \text{Tr}_{N-1,j} \quad j=1 \dots N_x - 1, \end{aligned}$$

то есть $3N_x - 1$ уравнений.

Общее количество уравнений составило:

$$3 N_x N_y - 3 N_x - N_y + 1 + 3N_x - 1 = 3 N_x N_y - N_y.$$

Четвертая группа конечно-разностных аналогов условий непроницаемости на торцах пластины имеют вид:

$$\begin{aligned} \text{Tr}_{i,0} &= \text{Tr}_{i,1} \quad i=0 \dots N_y - 1 \\ \text{Tr}_{i,N_x-1} &= \text{Tr}_{i,N_x} \quad i=0 \dots N_y - 1, \end{aligned}$$

то есть $2N_y$ уравнений.

Общее количество уравнений составило:

$$3 N_x N_y - N_y + 2N_y = 3 N_x N_y + N_y.$$

Пятая группа конечно-разностных аналогов условий на поверхности пластины имеют вид:

$$\begin{aligned} t_{N,j} &= T_{0,j} \quad j=0 \dots N_x + 1 \\ (\epsilon R + C_{\text{ж}} (\text{Tr}_{0,j} - t_{\text{ж}})) \cdot D_{N_y,j} \frac{w_{N,j} - w_{N-1,j}}{M_y} &= \lambda_{\text{пл}} \frac{\text{Tr}_{1,j} - \text{Tr}_{0,j}}{M_y} - \lambda \frac{t_{N,j} - t_{N-1,j}}{M_y} \\ j &= 0 \dots N_x + 1 \end{aligned}$$

то есть $2 N_x + 2$ уравнений.

Общее количество уравнений составило:

$$3 N_x N_y + N_y + 2 N_x + 2.$$

Последняя группа конечно-разностных аналогов условия насыщения на поверхности пластины на начальной итерации имеют вид:

$$w_{N,j} = (0,0004212 t_m^3 + 0,001831 t_m^2 + 0,4195 t_m + 4,727) \cdot 10^{-3}, \quad j=0 \dots N_x$$

где t_m – температура входного воздуха по мокрому термометру.

При дальнейших итерациях используется формула

$$w_{N,j} = (0,0004212 t_{N,j}^3 + 0,001831 t_{N,j}^2 + 0,4195 t_{N,j} + 4,727) \cdot 10^{-3}, \quad j=0 \dots N_x$$

где $t_{N,j}$ определяется из решения системы в предыдущей итерации.

Таким образом, добавляются еще $N_x + 1$ уравнений.

Общее количество уравнений составило:

$$3 N_x N_y + N_y + 2 N_x + 2 + N_x + 1,$$

то есть $3 N_x N_y + N_y + 3 N_x + 3$, что соответствует количеству неизвестных в системы конечно-разностных линейных уравнений.

Современные математические пакеты в состоянии решить такую систему достаточно большой размерности.

Алгоритм реализации данной модели состоит в следующем. На первом шаге вычисляется значение коэффициента диффузии при температуре входного воздуха, а значение плотности насыщенного пара при температуре входного воздуха по мокрому термометру. Решается система уравнений и определяется поле температур и плотностей пара в узловых точках сетки. Затем по найденному полю температур в каждом узле вычисляются значения коэффициента диффузии, а на поверхности пластины – значение плотности насыщенного пара, и система решается заново. Данный итерационный процесс завершается, когда температура на выходе из охладителя отличается от аналогичной температуры в предыдущей итерации менее чем на $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

На рис. 4 показано поле температур обрабатываемого воздуха в насадке длиной $0,3\text{ м}$ с каналами сечения 2 мм при входной температуре 30° и входной относительной влажности 40% . Светлым тоном показаны значения более высокой температуры, а темным – более низкой. Расчеты произведены при решении 2543 уравнений при $Ny=20$, а $Nx=40$. На рис. 5 показан график изменения температуры обрабатываемого воздуха по длине канала в насадке с этими параметрами.

Результаты расчетов по предложенной модели позволяют выявить ряд количественных и качественных характеристик процесса охлаждения воздуха в установках прямого принципа действия.

На рис. 6 показаны зависимости изменения температуры обрабатываемого воздуха по длине канала в насадке при различных относительных влажностях входного воздуха. Как видно из этого графика, глубина охлаждения существенно зависит от этого фактора. Так при $\varphi=50\%$ она составляет $8,15\text{ }^{\circ}\text{C}$, при $\varphi=40\%$ она составляет $10,05\text{ }^{\circ}\text{C}$, а при $\varphi=30\%$ – $12,1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Следующим параметром, который существенно влияет на эффективность работы охладителя, является сечение каналов. На рис. 7 показаны зависимости изменения температуры обрабатываемого воздуха по длине канала в насадке длиной $0,4\text{ м}$ при различных сечениях каналов.



Рисунок 4. Поле температур в половине сечения канала

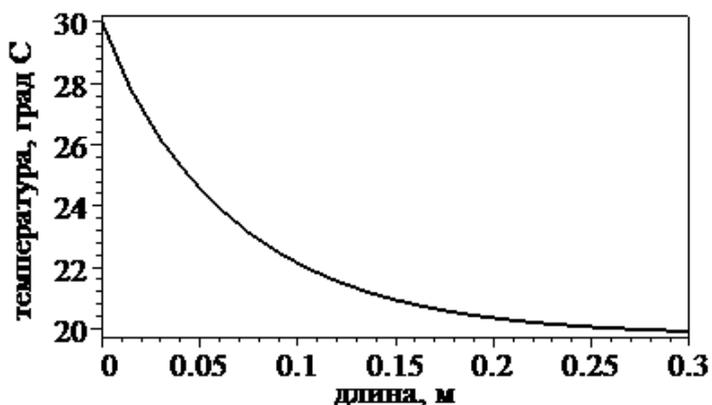


Рисунок 5. Зависимость температуры воздуха от длины насадки. $V=3\text{ м/с}$, $H=2\text{ мм}$.

Как видно из этого графика, снижение сечения канала испарительной насадки резко увеличивает интенсивность процесса охлаждения воздуха, хотя требует определенных технологических трудностей и, как это будет показано ниже, значительно

увеличивает аэродинамическое сопротивление охлаждающих установок, тем самым снижая расход воздуха и, как следствие, холодопроизводительность системы охлаждения.

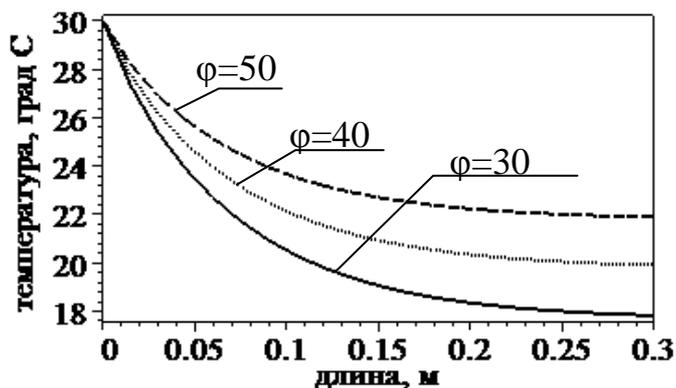


Рисунок 6. Зависимость температуры воздуха от длины насадки при различных относительных влажностях входного воздуха. $V=3\text{ м/с}$, $H=2\text{ мм}$.

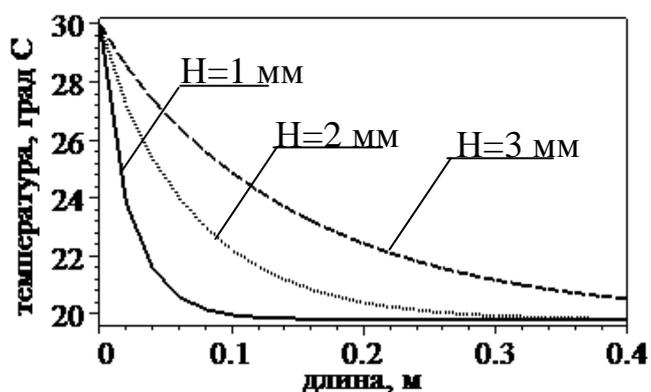


Рисунок 7. Зависимость температуры воздуха от длины насадки при различных сечениях канала H . $V=3\text{ м/с}$, $\varphi_{\text{вх}}=40\%$.

Еще одним параметром, влияющим на работу охладителя, является скорость движения воздуха. На рис. 8 и 9 показаны зависимости изменения температуры и относительной влажности обрабатываемого воздуха по длине канала в насадке длиной 0,4 м при различных его скоростях.

Как видно из этих графиков, увеличение скорости воздуха ведет к необходимости увеличения длины насадки. Этот факт особенно хорошо прослеживается на рис. 9, из которого видно, что при скорости 2 м/с относительная влажность обрабатываемого воздуха достигает значения 98% на длине канала 0,25 м, т.е. длину испарительной насадки можно изготавливать такого размера. При скорости 4 м/с относительная влажность обрабатываемого воздуха достигает значения 98% на длине канала 0,4 м, что также дает рекомендации о длине испарительной насадки. При скорости 6 м/с относительная влажность достигает значения 94,5% на длине канала 0,4 м, что показывает необходимость удлинять испарительные каналы.

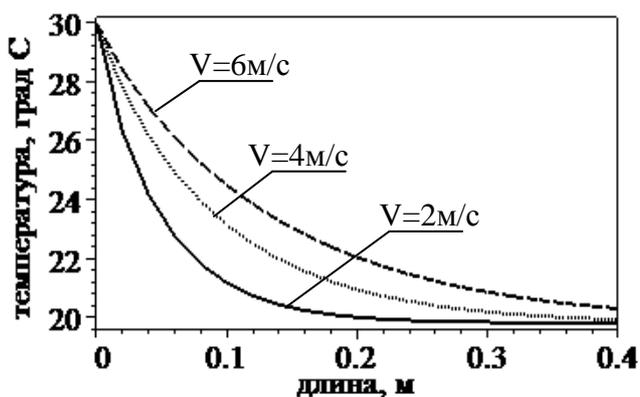


Рисунок 8. Зависимость температуры воздуха от длины насадки при различных скоростях воздуха. $H=2\text{ мм}$, $\varphi_{\text{вх}}=40\%$.

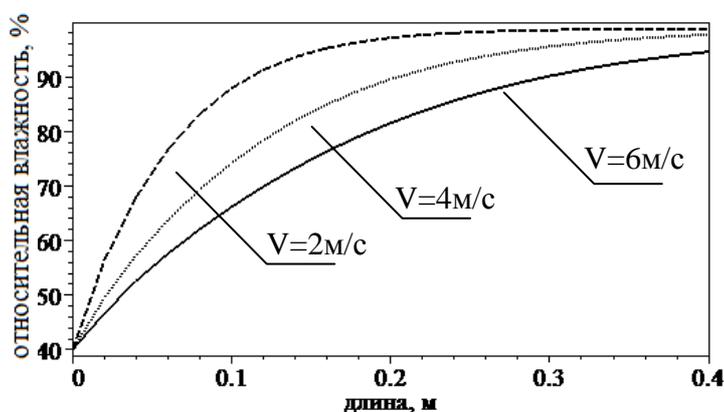


Рисунок 9. Зависимость относительной влажности воздуха от длины насадки при различных скоростях воздуха. $H=2\text{ мм}$, $T_{\text{вх}}=30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Как показали исследования, температура поверхности пластины не зависит от скорости обрабатываемого воздуха. Но самое главное в том, что эта температура практически не меняется по длине пластины и равна $\approx 19,7^{\circ}\text{C}$ при $t_{\text{вх}} = 30^{\circ}\text{C}$, $\phi_{\text{вх}} = 40\%$. С учетом этого нам удалось получить удобную в инженерных расчетах формулу для определения температуры воздуха в испарительной насадке прямого принципа действия:

$$t_{\text{min}} = t_{\text{нач}}(0,471 + 0,00717\phi_{\text{нач}}) - 3,372,$$

ошибка которой не превышает одного процента.

Далее была получена аналитическая формула для определения температуры воздуха в каналах охладителя:

$$T = t_{\text{пов}} + (t_{\text{нач}} - t_{\text{пов}}) \cdot e^{-\frac{8\lambda}{\rho C V H^2} x}.$$

Как видно из этих графиков (рис. 10), результаты расчетов по данной формуле практически совпадают с результатами, полученными при реализации математической модели, что говорит о возможности использования указанной формулы при инженерных расчетах.

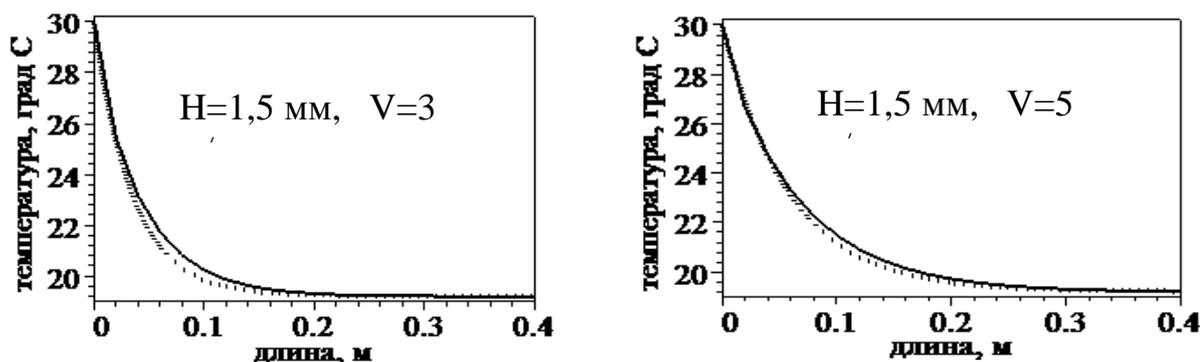


Рисунок 10. Сравнение результатов расчетов по полной модели (сплошная линия) и по формуле (штриховая линия)

Построенные математические модели и полученные с их помощью выводы и заключения требуют глубокой и продуманной практической проверки. К тому же необходимо изучить физические свойства материала, применяемого для изготовления пластин водоиспарительных охладителей. В частности важна практическая оценка таких показателей, как влагоемкость и коэффициент энергетической добавки. Оба оказывают решающее влияние на работу водоиспарительных охладителей и могут быть выявлены только экспериментальным путем.

Четвертый раздел «Экспериментальное исследование пластинчатых охладителей. Сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований». Для этого был изготовлен ряд водоиспарительных охладителей с различными геометрическими параметрами (рис.11).

Для изучения капиллярных свойств бумагоподобного материала было изготовлено несколько пластин, которые представляли собой каркас из оргстекла толщиной 1 мм на который с двух сторон с помощью двусторонней клейкой ленты был закреплен изучаемый материал. Эти пластины погружались в емкость с водой на глубину 1 см (рис. 12).

Результаты этих экспериментов, приведенные на рис. 13 и 14, не только подтверждают адекватность построенной математической модели, но и практически доказывают теоретические предположения о характере теплофизических процессов в каналах охладителя.



Рисунок 11. Лабораторные образцы водоиспарительных охладителей воздуха.

На рис. 13 представлена кривая зависимости глубины охлаждения от температуры входного воздуха. Данная зависимость носит прямо пропорциональный характер – с повышением температуры входного воздуха происходит увеличение глубины его охлаждения. Оценку этого результата необходимо проводить в тесной взаимосвязи с результатами исследований, представленными на рис. 14. На нем показана обратно пропорциональная зависимость глубины охлаждения воздуха от его относительной влажности. Вместе с тем известно, что при постоянном влагосодержании температура воздуха и его относительная влажность находятся в обратно пропорциональной зависимости. Принимая во внимание этот факт, поясним характер изменения представленных зависимостей. Относительно холодный воздух, при условии постоянного влагосодержания, имеет большую влажность, чем воздух с более высокой температурой. Этим объясняется способность более горячего, а значит и сухого, воздуха, попадая в каналы охладителя, интенсивнее абсорбировать влагу. С понижением температуры входного воздуха происходит увеличение его относительной влажности, а значит, процессы испарения влаги с поверхности пластин в поток такого воздуха становятся менее интенсивными, вследствие чего снижается глубина охлаждения.



Рисунок 12. Исследования материала пластин.

Таким образом, при различных температурно-влажностных параметрах входного воздуха изменяется глубина его охлаждения, но при этом температура обработанного воздуха остается практически постоянной. В этом заключается одно из несомненных преимуществ водоиспарительных охладителей – их саморегулируемость по температуре охлажденного воздуха, т.е. способность охладителей такого типа, за счет изменения глубины охлаждения, поддерживать постоянной температуру охлажденного воздуха при различных температурно-влажностных показателях воздуха на входе в них.

Экспериментальное изучение теплофизических процессов в каналах водоиспарительных охладителей, проводимое с целью проверки адекватности построенных математических моделей тепло и массо-переноса позволило получить ряд эмпирических величин для их последующего сравнения с аналогичными теоретическими показателями

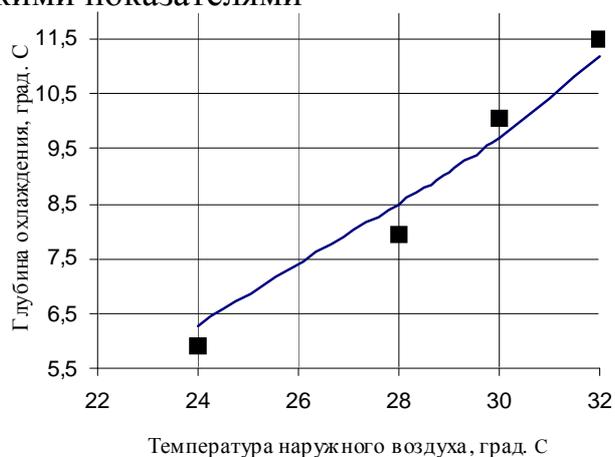


Рисунок 13. Влияние температуры входного воздуха на глубину его охлаждения, $G = 25 \text{ м}^3/\text{час}$, $d = \text{const}$

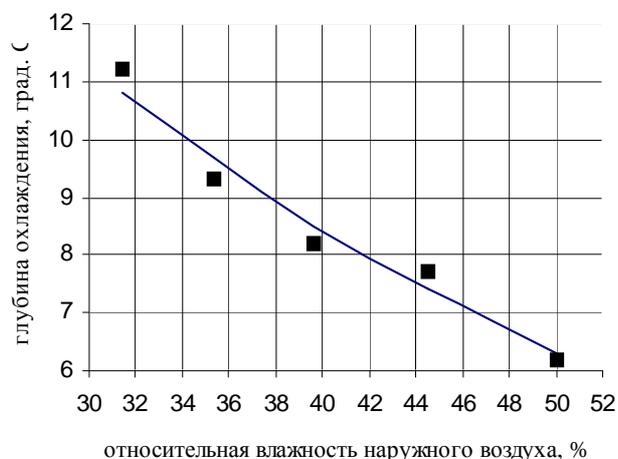


Рисунок 14. Влияние относительной влажности воздуха на глубину охлаждения, $G = 25 \text{ м}^3/\text{час}$, $d = \text{const}$

Статистические расчеты, проведенные по каждой сравниваемой величине, показывают, что отклонение теоретических данных от аналогичных им экспериментальных значений в общем случае не превышает 3%. Это объясняется тем, что в предлагаемых математических моделях не учитывается нелинейный показатель, характеризующий энергетический потенциал потока пара со стороны поверхности пластины водоиспарительного охладителя в охлаждаемый воздух.

Нелинейность данного элемента объясняет и характер полученных теоретических кривых. При различных исходных данных слагаемого, определяющего энергетический потенциал, может быть, как больше, так и меньше нуля. По этой причине одни точки эксперимента лежат чуть выше теоретических значений, а другие чуть ниже. Однако, как уже говорилось, данное отклонение не превышает 3%.

Проведенные лабораторные исследования композиционного материала для специальной техники ТУ 5445-055-00281097-2008, РФ. (КМСТ) показали, что он обладает достаточной жесткостью, что позволяет точно организовывать каналы воздухопроводного тракта с нужной площадью поперечного сечения. Его капиллярные свойства удовлетворяют заявленным требованиям, т.к. материал способен поднять воду на высоту до 25 см за 30 минут, при этом гарантированная высота подъема за 15 минут составляет 20 см (рис. 15).

Исследования, проводившиеся на блоках с различными геометриче-

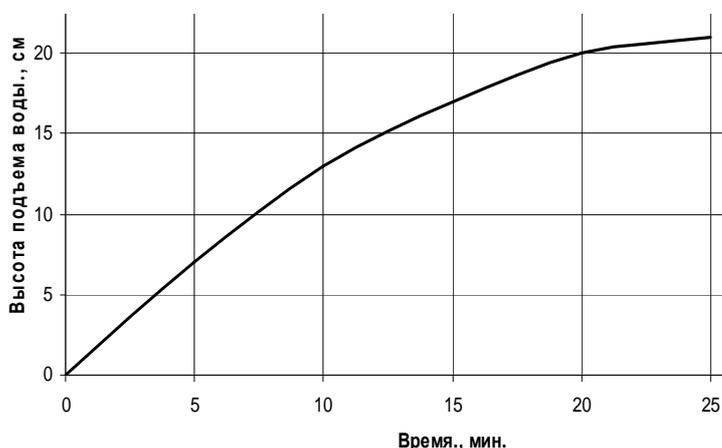


Рисунок 15. Оценка капиллярного эффекта КМСТ.

скими размерами, позволили выявить показатели влагоемкости и коэффициент энергетической добавки данного материала. Материал влагоемок и обладает водопоглощением до 900%, при этом не набухает и не подвергается геометрическим деформациям. Лабораторные испытания показали, что разработанный материал, обладая всеми ожидаемыми от него физическими и механическими свойствами, позволяет организовать нормальную работу водоиспарительных охладителей на протяжении длительного времени.

При испарении воды с поверхности влажной пластины, проходящий в канале охладителя воздух теряет часть своей энергии. Для количественной оценки затрат энергии воздуха на испарение в математической модели тепло- и массопереноса необходимо было учесть физические свойства орошаемых пластин. В частности, требовалось оценить энергетические затраты воздушного потока на отрыв влаги с пластины, которые выражаются в коэффициенте энергетической добавки. Исследования проводились на прямом пластинчатом охладителе. Температура подаваемой воды для орошения пластин была равна температуре пластин, а значит и температуре охлаждаемого воздуха.

Проводились измерения температурно-влажностных значений обрабатываемого воздуха на входе в охладитель и на выходе из него.

С учетом полученных результатов, коэффициент энергетической добавки определяли по предложенной формуле

$$C_p(t_{\text{нач}} - t_{\text{кон}}) = (\epsilon R + C_{\text{ж}}(t_{\text{пов}} - t_{\text{ж}})) [\phi_{\text{кон}} w_{\text{н}}(t_{\text{кон}}) - \phi_{\text{нач}} w_{\text{н}}(t_{\text{нач}})],$$

Расчеты, проведенные по указанной формуле, позволили определить коэффициент энергетической добавки, связанный с увеличением энергии воздуха на отрыв жидкости с поверхности пластины. Для применяемого материала пластин значения этого коэффициента для рабочего диапазона температур лежат в пределах от 1,2 до 1,4.

В пятом разделе «Оптимизация режимов работы охладителей и теплообменников» проведен анализ и учет аэродинамических сопротивлений в каналах водоиспарительных охладителей.

При работе водоиспарительного охладителя поток воздуха при движении встречает транспортное сопротивление $\Delta P_{\text{тр}}$, потерю напора при внезапном сужении на входе в испарительную насадку ΔP_c , потерю напора при внезапном расширении на выходе из испарительной насадки.

Транспортные потери по длине канала постоянного поперечного сечения при ламинарном режиме течения ($Re < 3000$) и при $\rho = 1,13 \text{ кг/м}^3$ формула имеет вид

$$\Delta P_{\text{тр}} = 217 \cdot \frac{L \cdot V}{h^2} \cdot 10^{-6}. \quad (5.2)$$

При увеличении числа Рейнольдса начинают преобладать силы инерции, пропорциональные квадрату скорости. При этом возникает турбулентное движение, что приводит к резкому увеличению сопротивлений. При местном изменении геометрии канала возникают местные сопротивления, которые всегда сопровождаются потерями давления. Для определения потерь давления на местные сопротивления используется формула Вейсбаха

$$\Delta P = \xi \cdot \frac{\rho \cdot V^2}{2},$$

где ξ - коэффициент местных потерь.

Для определения местных сопротивлений

$$\Delta P_M = \Delta P_c + \Delta P_p = (\xi_c + \xi_p) \cdot \frac{\rho \cdot V^2}{2} = \xi_M \cdot \frac{\rho \cdot V^2}{2},$$

где $\xi_M = \xi_c + \xi_p$ назовем коэффициентом местного сопротивления.

Аэродинамическое сопротивление испарительной насадки, складываемое из транспортных и местных сопротивлений, можно представить в виде:

$$\Delta P = 217 \cdot \frac{L \cdot V}{h^2} \cdot 10^{-6} + (0,534 - 12,5 \cdot V \cdot h) \left(\frac{h}{h + hp} \right)^{1,3} \cdot \frac{\rho V^2}{2}. \quad (5.5)$$

Испарительная насадка шириной $S_{гор}$ и высотой $S_{вер}$ при прямом охлаждении имеет чередующиеся «мокрые» каналы и пластины. Тогда $S_{гор} = (h + hp)n + hp$, где n - количество «мокрых» каналов в насадке. Сечение, по которому воздух, имеющий расход G , проходит в пластине, определяется по формуле: $nhS_{вер}$, а скорость воздуха в каналах соответственно по формуле:

$$V = G \frac{h + hp}{(S_{гор} - hp)hS_{вер}}. \quad (5.6)$$

Подставляя последнюю формулу в выражение для определения аэродинамического сопротивления испарительной насадки, получаем функциональную зависимость этого сопротивления от расхода воздуха и геометрических параметров охладителя:

$$\Delta P = f_1(G, L, h, hp, S_{гор}, S_{вер}).$$

За основной критерий оптимизации охладительного комплекса наиболее рационально принимать такие геометрические параметры и режимы его работы, при которых будет обеспечиваться максимальная холодопроизводительность, т.к. в этом случае будет наблюдаться наибольшая нейтрализация теплопритоков из помещения в жаркое время года. Ограничениями при достижении этого критерия являются габаритные возможности охладителей, их конструктивно-технологические особенности, а так же регламентируемые значения относительной влажности и скорости воздуха в зоне размещения птицы.

Прежде всего, ориентируясь на габаритные возможности, подбирается вентиляторный блок с известными расходно-напорными характеристиками

$$\Delta P_B = f_2(G). \quad (5.8)$$

Приравнивая правые части (5.7) и (5.8), получаем уравнение для определения расхода воздуха при выбранных геометрических параметрах испарительной насадки:

$$f_1(G, L, h, hp, S_{гор}, S_{вер}) = f_2(G). \quad (5.9)$$

Полученное значение расхода воздуха подставляется либо в полную модель прямого охлаждения, либо, с учетом (5.6), в формулу (5.9) для определения закона изменения температуры воздуха в охладителе и определения его холодопроизводительности.

Анализ поведения величин, непосредственно влияющих на холодопроизводительность Q , показал, что глубина охлаждения воздуха вследствие увеличения рабочей площади пластин возрастает, а расход воздуха уменьшается по причине возрастающих аэродинамических сопротивлений насадки, но, не смотря на уменьшение расхода воздуха, холодопроизводительность растет вследствие интенсивного роста глубины охлаждения. Для заданного вентилятора Multifan-130-V4DI5-5 максимальное значение Q достигается при относительной влажности воздуха 93,8%, т. е. не при полном насыщении воздуха влагой.

При дальнейшем увеличении длины холодопроизводительность, достигнув определенного максимума, убывает. Это происходит вследствие продолжающегося роста аэродинамических сопротивлений насадки, что влечет снижение расхода воздуха, не смотря на некоторое увеличение глубины охлаждения (рис. 16). Отметим, что снижение холодопроизводительности происходит более плавно, чем ее рост. Такое поведение кривой обосновано менее интенсивным увеличением аэродинамических сопротивлений вследствие снижения скорости воздуха.

Из описанного выше следует, что увеличение длины испарительной насадки охладителя свыше определенного значения приводит к снижению ее холодопроизводительности, но вместе с тем приближает температурный коэффициент эффективности E к его максимуму. Естественно, что взаимное влияние секундного расхода воздуха и глубины охлаждения может привести к тому, что при различных расходно-напорных характеристиках вентиляторных блоков максимальная холодопроизводительность может быть получена при различных E .

Таким образом, расчеты, проведенные по совместной модели тепло-массопереноса и аэродинамических свойств пластинчатого охладителя, показали, что рациональный выбор геометрических размеров и режимов работы охладителя возможен только при условии учета расходно-напорных характеристик вентиляторных блоков для которых он предназначен. Соотношение размеров ширины каналов охладителя и его длины наряду с характеристиками входного воздуха определяется аэродинамическими свойствами вентиляторов. В свою очередь, подбор вентиляторов необходимо осуществлять в зависимости от зоотехнических требований, предъявляемых к конкретному птицеводческому помещению. При этом в обязательном порядке учитывается не только возраст, количество и способ содержания птицы, но и климатическая зона в которой расположено птицеводческое хозяйство, а также его индивидуальные геометрические особенности, к которым в первую очередь относят габаритные размеры, количество клеточных рядов и их высоту, расстояние от клеток до вентиляционных отверстий в стенах, расположение вентиляционных приточных шахт и т.д.

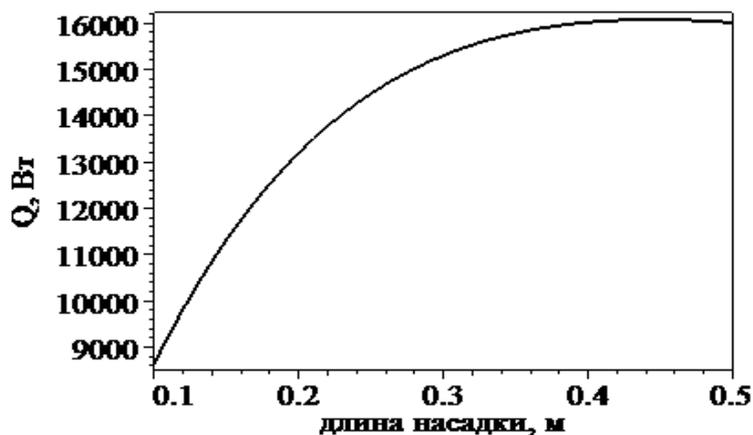


Рисунок 16. Зависимость холодопроизводительности от длины испарительной насадки.

Проведем расчет теплового баланса птицеводческого помещения, рассчитанного на клеточное содержание 30 000 кур-несушек со средней массой одной птицы 1,6 кг. Общее количество постоянных теплопритоков составляет 322,6 кВт. Система вентиляции помещения – механическая комбитоннельного типа. В жаркий период года 6 вытяжных вентиляторов марки Multifan-130-V4DI5-5, расположенных в одном из торцов здания (рис. 17) обеспечивают необходимый воздухообмен в размере 180 тыс. м³/час. Приток воздуха в это время осуществляется через расположенные в противоположном торце здания вентиляционные проемы.

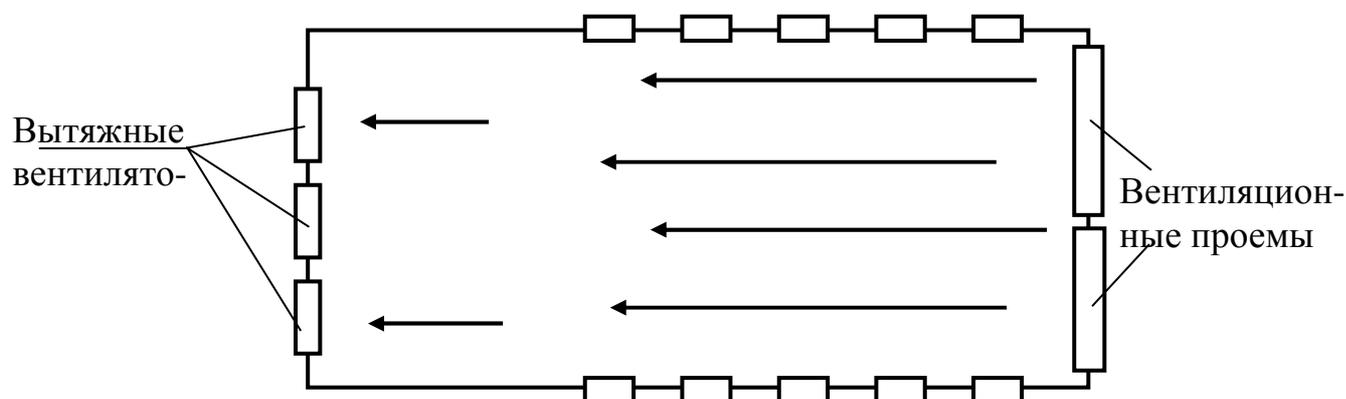


Рисунок 17. Комбинация тоннельной и продольной вентиляции в жаркое время.

Для охлаждения воздуха в указанных проемах рекомендуется располагать водоиспарительные охладители пластинчатого типа, которые представляют собой блок капиллярно-пористых пластин с нижним подводом воды (рис. 18). Площадь поперечного сечения охладительного блока, связана с конструктивными особенностями данного помещения, и равна 20 м². Длина пластин определяется в зависимости от расходно-напорных характеристик вентиляторов, которыми оборудовано помещение и составляет 320 мм. При этом глубина охлаждения обрабатываемого воздуха в зависимости от среднесуточных изменений температурно-влажностных параметров окружающей среды находится в пределах от 6 до 14 °С. Таким образом, холодопроизводительность пластинчатого водоиспарительного блока в совокупности с указанными вентиляторами составляет от 400 до 900 кВт.

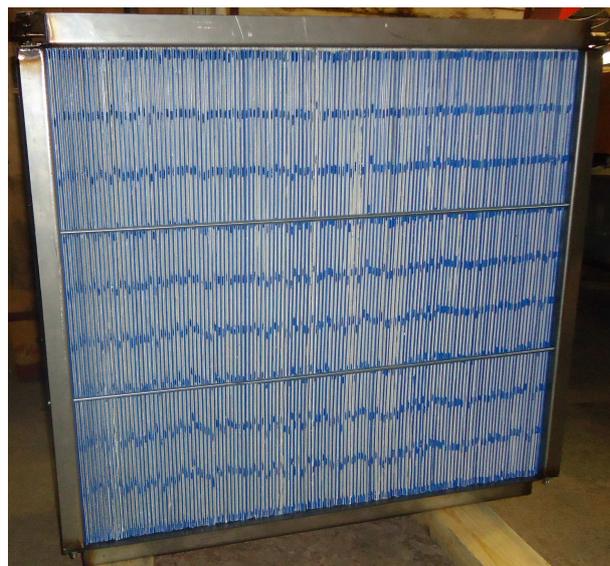


Рисунок 18. Фрагмент водоиспарительного охладителя

На рис. 19 показаны зависимости температуры воздуха в птицеводческом помещении при работе пластинчатого водоиспарительного блока (сечение каналов 2 мм) в совокупности с указанными вентиляторами при различных внешних условиях. Как видно из представленной зависимости, работа водоиспарительного пластинчатого охладителя позволяет значительно улучшить температурные параметры воздушной среды птицеводческого помещения, приблизив их значения к регламентированным нормам. Для сравнения на рис. 20 показаны возможности системы венти-

ляции, системы с орошаемыми ячеистыми матами и системы с пластинчатыми охладителями.

Помимо очевидного преимущества по охлаждению воздушной среды птицеводческого помещения пластинчатыми блоками характер зависимости изменения температуры воздуха при работе различных систем позволяет сделать вывод о том, что при их работе эффективность охлаждения обрабатываемого воздуха выше в сравнении с ячеистыми матами.

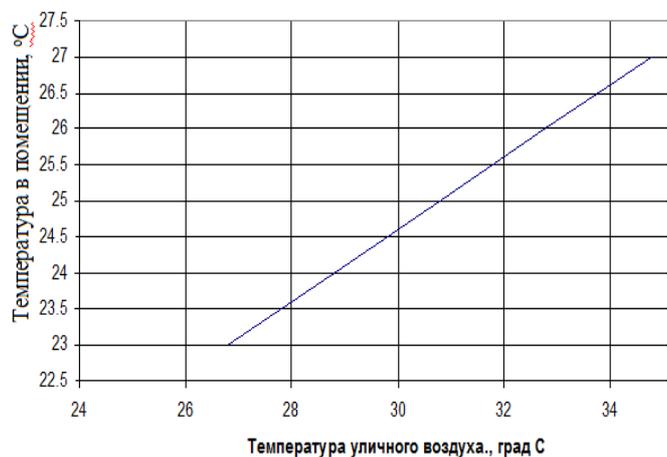


Рисунок 19. Зависимость температуры воздуха в помещении от температуры уличного воздуха.

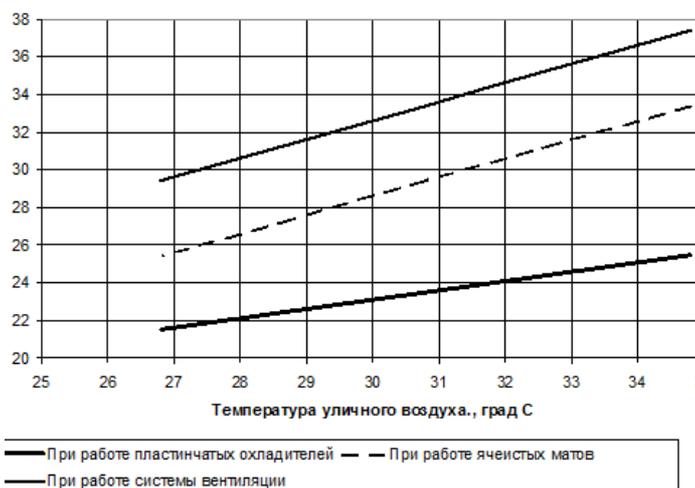


Рисунок 20. Зависимость температуры воздуха в помещении от температуры внешней среды.

Рассмотрим вариант птицеводческого помещения с тем же количеством и способом содержания птицы, вентиляционная система которого не имеет торцевых вентиляционных проемов и весь воздух поступает в помещение через боковые вентиляционные окна (рис. 21). При этом вентиляция, как и в первом случае, строится по схеме с пониженным давлением. Разряжение создается шестью вентиляторами Multifan-130-V4DI5-5, обеспечивающими воздухообмен в размере 190 тыс. м³/час.

Для организации охлаждения приточного воздуха предлагается разместить пластинчатые водоиспарительные охладительные блоки прямого принципа действия в боковых вентиляционных окнах. При этом свободные окна необходимо закрыть, чтобы обеспечить приток в помещение только охлажденного воздуха. Эти блоки помимо пластинчатых водоиспарительных охладителей включают в себя нагнетательные вентиляторы и блок управления подводом воды и регулирования производительностью данного блока (рис. 22)

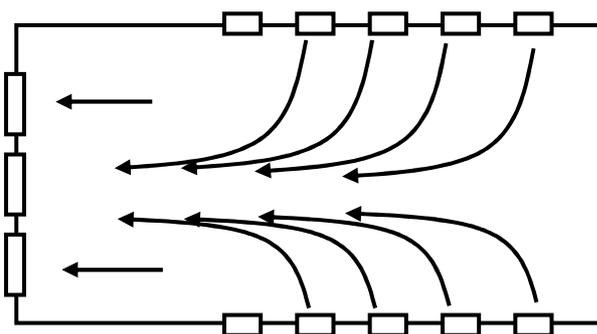


Рисунок 21. Птицеводческое помещение с боковыми вентиляционными окнами

Для указанного помещения необходимо 16 блоков, оборудованных центробежными вентиляторами 3G280 с двигателями M3G084-FA. Каждый вентилятор обеспечивает расход воздуха 8 тыс. м³/час.

Геометрические размеры охладительного блока рассчитаны по предложенной методике. Габариты блока высота*ширина*длина 0,75м*0,75м*0,38м. Ширина ка-

налов 2 мм. При указанных размерах с данными центробежными вентиляторами холодопроизводительность одного блока составляет 24 кВт.

Расчеты температуры внутри помещения при работе такой системы охлаждения показывают, что в зависимости от температуры наружного воздуха в помещении будут организованы следующие температурные параметры воздушной среды (рис. 23).

В рассмотренных примерах при указанных режимах работы в рассматриваемом помещении создаются такие влажностные условия, которые удовлетворяют зоотехническим требованиям при содержании птицы (рис. 24).

В холодный период года критерием оптимизации является минимизация энергетических затрат на обогрев птицеводческого помещения, а ограничения – осуществление необходимой кратности воздухообмена и поддержание в помещении регламентируемой температуры.

Оценку теплового баланса птицеводческого помещения в зимний период, проведем на примере птичника, рассчитанного на содержание 30 тыс. кур-несушек со средней массой 1,6 кг, содержащихся в клеточных батареях. Для обогрева в зимнее время года помещение оборудовано пластинчатыми рекуператорами, расположенными на крыше здания. Приток и забор воздуха из птичника происходит через вентиляционные шахты. Для этого каждый рекуператор помимо пластинчатого теплообменного блока оборудован двумя центробежными вентиляторами 3G280 с двигателями М3G084-FA.



Рисунок 22. Водоиспарительный пластинчатый охладитель воздуха (охладительный блок)

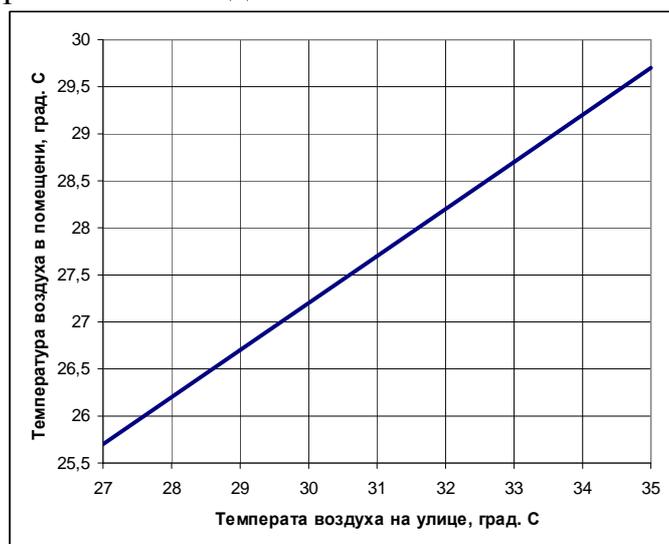


Рисунок 23. Зависимость температуры воздуха в помещении от температуры внешней среды.

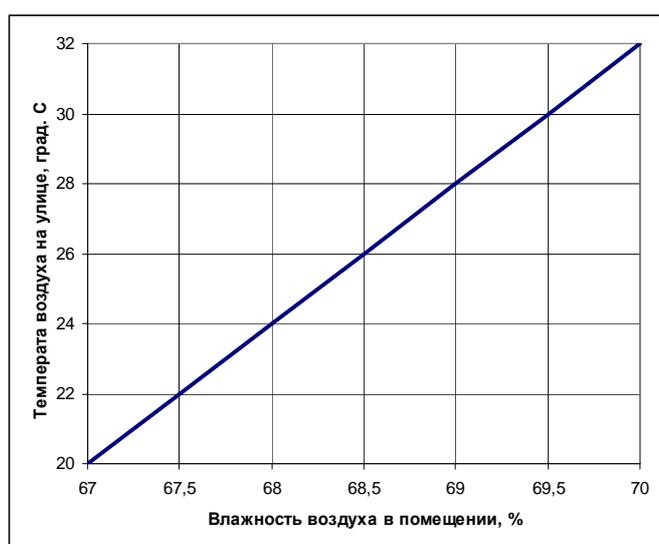


Рисунок 24. Зависимость относительной влажности воздуха в помещении от параметров наружного воздуха.

Расход вентилятора 4 тыс. м³/час. Для обеспечения необходимой кратности обмена воздуха, в объеме 32 тыс. м³/час, в рассматриваемом птичнике размещено 8 рекуператоров. Их расстановка по крыше здания обеспечивает равномерное удаление и приток воздуха в указанное помещение (рис. 25).

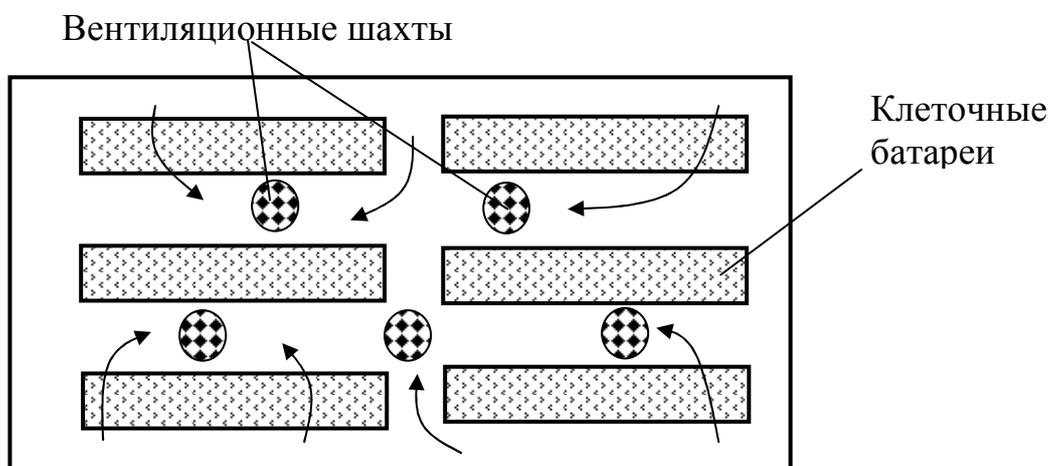


Рисунок 25. Размещение рекуператоров на крыше здания

Расчеты, проведенные по предложенным моделям теплопереноса с учетом аэродинамики теплообменников, показали, что для минимальной системы вентиляции данное помещение при указанных вентиляторах необходимо оборудовать рекуператорами, которые позволяют при температуре -30°C подогреть поступающий в помещение воздух до -10°C .

Тепловой баланс помещения с теплопритоками от птицы 288 кВт показывает, что при -30°C в помещении создается комфортная температура $10-12^{\circ}\text{C}$, при этом весь воздух из помещения проходит через теплообменники. При повышении температуры воздуха на улице часть воздуха из помещения удаляется через дополнительные вентиляционные каналы, минуя рекуператоры, и тем самым комфортные значения температур сохраняются при необходимой кратности обмена.

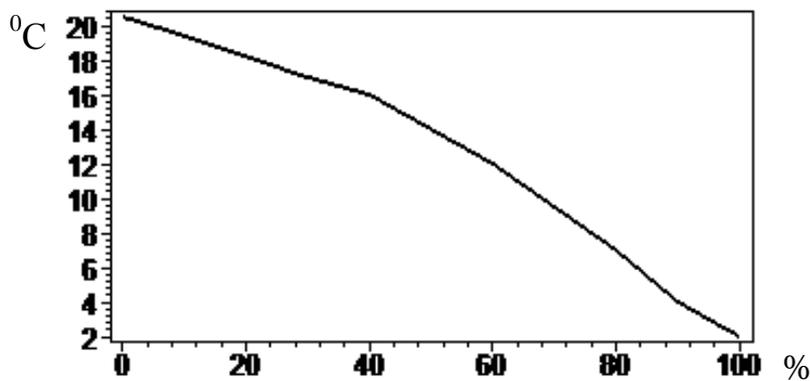


Рисунок 26. Зависимость температуры в помещении от процентного отношения объема бросового воздуха к общему объему отведенного воздуха

На рис. 26 показана зависимость температуры в помещении от процентного отношения объема воздуха, отведенного через дополнительную вентиляцию к общему объему отведенного воздуха при наружной температуре минус 20°C . При температуре наружного воздуха выше минус 10°C необходимость в рекуперативном подогреве приточного воздуха отпадает, а при температуре наружного воздуха выше 0°C необходимо увеличивать расход приточного воздуха для создания регламентируемой температуры в помещении.

Таким образом, с помощью рекуперационной установки можно утилизировать и вернуть обратно в помещение до 95% тепла, которое обычно просто выбрасывается в атмосферу вместе с отработанным воздухом. Использование системы микроклимата с рекуперацией тепла позволяет в любое время года добиваться в помещении параметров микроклимата, близких к научно обоснованным и, как следствие, избавившись от болезней птицы и ее падежа, достигнуть максимальной продуктивности.

В шестом разделе «Определение экономической эффективности от применения пластинчатых теплообменников в птицеводческих помещениях» проведен расчет экономической эффективности применения теплообменников в жаркий и холодный сезон.

Оценка экономического эффекта от применения предлагаемых устройств в жаркое время года для помещения рассчитанного на клеточное содержание 30 000 кур-несушек со средней массой одной птицы 1,6 кг и общим количеством постоянных теплопритоков 322,6 кВт показал, что в сравнении с системой орошаемых матов применение водоиспарительных охладителей воздуха в жаркий период года для помещения, позволяет получить экономический эффект в размере 765576 руб. в год; в сравнении с птичнике оборудованным системой вентиляции – 407740 руб. в год. Оценка экономического эффекта от применения предлагаемых устройств в холодное время года показал, что применение рекуператоров тепла для помещения, рассчитанного на клеточное содержание 30 000 кур-несушек со средней массой одной птицы 1,6 кг и общим количеством постоянных теплопритоков 322,6 кВт, позволяет получить экономический эффект в размере 932145 руб. в год.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. Обоснован наиболее рациональный способ нормализации температурно-влажностных параметров воздушной среды птицеводческих помещений в жаркое и холодное время года, основанный на тепловой обработке приточного воздуха пластинчатыми теплообменниками. Для холодного времени года они представляют противоточные рекуперационные установки, а в жаркое время – это пластинчатые охладители водоиспарительного принципа действия.

2. Обоснованы критерии эффективности работы теплообменников в птицеводческих помещениях. В частности, для охладителей теоретически и экспериментально выявлены наиболее рациональные значения глубины охлаждения воздуха, необходимые значения холодопроизводительности, определяемые в зависимости от количества, вида и способа содержания птицы. Для рекуператоров определена необходимая степень подогрева приточного воздуха.

3. Определены необходимые физико-механические свойства капиллярно-пористого материала для пластин водоиспарительных охладителей, обеспечивающими их эффективную работу. С учетом этих требований разработан бумагоподобный материал обладающий необходимыми физико-механическими свойствами. Капиллярный эффект полученного материала гарантирует его смачиваемость при нижнем подводе воды на высоту 20 см, влагоемкость материала составляет 500 – 600%, коэффициент разбухания материала не превышает 6%, что позволяет успеш-

но применять указанный материал в качестве пластин для водоиспарительных охладителей.

4. Разработана математическая модель энергетического баланса в водоиспарительных охладителях, отличающаяся учетом специфики испарительных свойств созданного материал теплообменных пластин.

5. Разработаны математические модели процессов тепло–массопереноса в каналах испарительных насадок водоиспарительных охладителей и противоточных теплообменниках с учетом продольно–поперечной теплопроводности пластин.

6. Предложен метод реализации представленных моделей, основанный на их конечно-разностном аналог на сетке с N_x шагами по длине каналов, N_y шагами по сечению каналов, $N_y/2+1$ шагами по сечению пластины.

7. Определены этапы исследований, позволившие дать конкретные рекомендации по конструированию указанных установок. Они включают в себя оценку теплового и влажностного балансов помещения для существующей системы вентиляции, определение режимов работы охладительных блоков и рекуператоров, расчет их геометрических размеров и способ включения в систему вентиляции. Предложенная методика исследований учитывает условия, влияющие на эффективность работы теплообменников.

8. На основании предложенных рекомендаций для птицеводческого помещения, рассчитанного на клеточное содержание 30 000 кур-несушек со средней массой одной птицы 1,6 кг и общим количеством постоянных теплопритоков 322,6 кВт, построены опытные и промышленные образцы охладительных установок и рекуператоров тепла, позволяющих поддерживать в этих помещениях необходимые температурно-влажностные параметры воздушной среды в течении года.

9. Определены перспективы практического использования теории на практике путем проведения оптимизации геометрических параметров и режимов работы охладителей и теплообменников.

10. Обоснованы допустимые климатические пределы использования предложенных математических моделей на практике. Установлено, что адекватная оценка работы предлагаемых моделей возможна при расчетах геометрических параметров теплообменников для диапазона температур уличного воздуха от -40 до $+40$ °С, при относительной влажности от 15 до 55 % в жаркое время года.

11. Создана основополагающая база практических рекомендаций и программных модулей для выбора систем нормализации температурно-влажностных параметров в птицеводческих помещениях, основанная на моделировании протекающих в них теплофизических процессов.

12. Для указанного помещения определены наиболее рациональные геометрические параметры и режимы работы водоиспарительных охладителей и рекуператоров тепла. В частности для охладителей установлено, что при тоннельной системе вентиляции их рационально располагать в торцевых вентиляционных проемах. При этом площадь их поперечного сечения составляет 20 м^2 , а глубина 0,32 м. Это позволяет достичь глубины охлаждения от 6 до 14 °С. В совокупности с установленными в помещении вытяжными вентиляторами марки Multifan-130-V4DI5-5, которые обеспечивают необходимый воздухообмен в размере 180 тыс. $\text{ м}^3/\text{ час}$ такие охладительные блоки обеспечивают холодопроизводительность от 400 до 900 кВт. Это позволяет снизить температуру воздуха внутри помещения на 6 – 11 °С. В холодное

время года установка рекуператоров с габаритными размерами 1м*1м и каналами длиной 1,2 м, сечением 3 мм при необходимом расходе воздуха для одного рекуператора 4 тыс. м³/час в существующую систему вентиляции указанного птичника позволяет вернуть в помещение до 95% тепла удаляемого из него воздуха.

13. Проведенная оценка экономического эффекта от применения предлагаемых устройств в жаркое время года для помещения, рассчитанного на клеточное содержание 30 000 кур-несушек со средней массой одной птицы 1,6 кг и общим количеством постоянных теплопритоков 322,6 кВт, показал, что в сравнении с системой орошаемых матов применение водоиспарительных охладителей воздуха в жаркий период года для помещения, позволяет получить экономический эффект в размере 765576 руб. в год; в сравнении с птичником оборудованным системой вентиляции – 407740 руб. в год.

14. Проведенная оценка экономического эффекта от применения предлагаемых устройств в холодное время года показал, что применение рекуператоров тепла для помещения, рассчитанного на клеточное содержание 30 000 кур-несушек со средней массой одной птицы 1,6 кг и общим количеством постоянных теплопритоков 322,6 кВт, позволяет получить экономический эффект в размере 932145 руб. в год.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, определенных ВАК

1. Гулевский, В.А. К вопросу о холодопроизводительности водоиспарительных охладителей / В.А. Гулевский, В.П. Шацкий // Известия ВУЗов. Строительство - №4. Новосибирск, 2007. - С. 72 – 75.

2. Гулевский, В.А. К вопросу о работе водоиспарительных охладителей / В.А. Гулевский, В.П. Шацкий, А.С. Чесноков// Научный вестник ВГАСУ. – № 3(11). – Воронеж, 2008. - 95 – 100с.

3. Gulevsky V.A. A note on water vaporizing type coolers. Scientific herald of Voronezh state university of architecture and civil engineering. / Shatsky V.P., Vysotskaja Z.V., Gulevsky V.A. // Construction. Architecture. Transport. 2008. Т. 3. № 11. С. 95.

4. Гулевский, В.А. Водоиспарительное охлаждение воздуха птицеводческих помещений / В.А. Гулевский, В.П. Шацкий, А.С. Чесноков// Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 10. – Москва, 2008. - С. 31 – 32.

5. Gulevsky V.A. To the question about work of water-evaporating coolers / Shatsky V.P., Vysotskaja Z.V., Gulevsky V.A. // Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture. 2009. № 3-4. С. 46-51.

6. Гулевский, В.А. К вопросу о расчете геометрических размеров водоиспарительных охладителей воздуха / В.А. Гулевский, В.П. Шацкий, А.С. Чесноков// Известия ВУЗов. Строительство - №5. Новосибирск, 2010. - С. 50 – 57.

7. Гулевский, В.А. Совместное моделирование тепло-массопереносных и аэродинамических процессов в водоиспарительных охладителях / В.А. Гулевский, В.П. Шацкий, А.С. Чесноков// Научный вестник ВГАСУ. – № 3(19). – Воронеж, 2010. - С. 40 – 45.

8. Гулевский, В.А. О некоторых аспектах моделирования работы пластинчатых теплообменников / В.А. Гулевский, В.П. Шацкий// Известия ВУЗов. Строительство - №12. Новосибирск, 2011. - С. 84 – 90.

9. Гулевский, В.А. К вопросу об охлаждении воздуха в животноводческих помещениях / В.А. Гулевский, В.П. Шацкий// Вестник Воронежского государственного аграрного университета. Научный журнал. Воронеж, 2012. - №2 (33). - С. 135 – 140.

10. Гулевский, В.А. Моделирование теплообмена в пластинчатых теплообменниках / В.А. Гулевский, В.П. Шацкий // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. Научный журнал. Воронеж, 2012. - С. 140 – 144.

11. Gulevsky V.A. Joint modeling of heat and mass transfer and aerodynamic process in evaporate water collers / Shatsky V.P., Chesnokov A.S., Gulevsky V.A. // Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture. 2012. - № 3. - С.26-32.

12. Гулевский, В.А. Особенности реализации математической модели тепло- и массообмена в косвенно-рекуперативных водоиспарительных охладителях / В.А. Гулевский, В.П. Шацкий// Известия ВУЗов. Строительство - №4. Новосибирск, 2012. С. 39-47.

13. Гулевский, В.А. Пластинчатые охладители воздуха водоиспарительного принципа действия / В.А. Гулевский, В.П. Шацкий, Е.Н. Осипов// Птицеводство. М., 2013. - №12. С.35–38.

14. Гулевский, В.А. Моделирование работы пластинчатых водоиспарительных охладителей косвенного принципа действия/ В.А. Гулевский, В.П. Шацкий// Лесотехнический журнал. Научный журнал. Воронеж, 2013. – №4 (12) – С. 160 – 167.

15. Гулевский, В.А. Применение теплообменников (рекуператоров) для нормализации микролимата животноводческих помещений / В.А. Гулевский, В.П. Шацкий, Н.Г. Спирина// Известия ВУЗов. Строительство - №9. Новосибирск, 2013. С. 64-68.

Монография

16. Гулевский, В.А. Микроклимат стационарных объектов птицеводства. Монография. LAP LAMBERT Academic Publishing. – 2012. 110 с.

Публикации в других изданиях и материалах конференций

17. Гулевский, В.А. О моделировании физических процессов в водоиспарительных охладителях / В.А. Гулевский, В.П. Шацкий // Математическое моделирование, компьютерная оптимизация технологий, параметров оборудования и систем управления. Межвузовский сб.науч. тр., Выпуск 10. Воронеж. – ВГЛТА, 2005. – С. 131–134.

18. Гулевский, В.А. Моделирование процессов косвенно-испарительного охлаждения воздуха в МЭС / В.А. Гулевский, В.П. Шацкий // Вестник ВГАУ. Сб. науч. Тр./ ВГАУ. – Воронеж, 2006. – С. 142-148.

19. Гулевский, В.А. Об аналитическом решении математической модели теплопереноса в каналах водоиспарительного охладителя / В.А. Гулевский, В.П. Шацкий, Ж.В. Высоцкая // Современные методы теории функций и смежные проблемы. Материалы воронежской зимней математической школы. Воронеж, 2007. С. 242-243.
20. Гулевский, В.А. О возможности аналитического решения математической модели теплопереноса в каналах водоиспарительного охладителя / В.А. Гулевский, В.П. Шацкий // Материалы международной научной конференции. «Математика. Компьютер. Образование» М., 2007. С.113.
21. Гулевский, В.А. О параметрах водоиспарительных насадок, встроенных в вентиляционную систему / В.А. Гулевский, В.П. Шацкий // Мировой опыт и перспективы развития сельского хозяйства. Материалы международной конференции, посвященной 95-летию ВГАУ. Воронеж, 2008. С. 223-226.
22. Гулевский, В.А. Моделирование процессов тепло и массопереноса в каналах водоиспарительных охладителей / В.А. Гулевский, В.П. Шацкий // Актуальные проблемы сушки и термо-влажностной обработки материалов. Международный технический семинар. – Воронеж. – ВГЛТА, 2010. С. 549 – 557.
23. Гулевский, В.А. Энергосберегающие охладители воздуха для птицеводческих помещений / В.А. Гулевский, В.П. Шацкий // Материалы II Международной молодежной научной конференции «Молодежь и XXI век». – Курск, 2010. С. 25.
24. Гулевский, В.А. К вопросу о водоиспарительном охлаждении производственных помещений / В.А. Гулевский, В.П. Шацкий, А.С. Чесноков// Материалы XIV международной научно-производственной конференции 17-20 мая 2010 г. «Проблемы сельскохозяйственного производства на современном этапе и пути их решения», Белгород, 2010. – С.222.
25. Гулевский, В.А. О возможности получения аналитического выражения температуры воздуха в водоиспарительных охладителях / В.А. Гулевский, В.П. Шацкий, А.С. Чесноков// Современные методы теории краевых задач/ Материалы Воронежской весенней математической школы «Понтрягинские чтения-XXI».- Воронеж, 2010.-С. 249.
26. Гулевский, В.А. К вопросу о моделировании физических процессов в рекуперативных пластинчатых теплообменниках / В.А. Гулевский, В.П. Шацкий, Н.Г. Спирина// Материалы международной научной конференции. Образование, наука, производство и управление в XXI веке. Том 3. Старый Оскол, 2011. С.163–166.
27. Гулевский, В.А. Обоснование выбора и возможности водоиспарительных охладителей / В.А. Гулевский, В.П. Шацкий, Л.И. Федулова// XII Международная молодежная научная конференция СЕВЕРГЕОЭКОТЕХ-2011. Часть 5. Ухта, 2011. С. 341 – 345.
28. Гулевский, В.А. К вопросу о преимуществах водоиспарительного охлаждения / В.А. Гулевский, В.П. Шацкий, Л.И. Федулова // Актуальные вопросы в научной работе и образовательной деятельности: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции. Часть 11. Тамбов, 2013. С. 126 – 127.
29. Гулевский, В.А. Моделирование процесса охлаждения молока противоточными пластинчатыми теплообменниками / В.А. Гулевский, В.П. Шацкий// Мате-

риалы научной конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов «Инновационные технологии и технические средства для АПК», Воронеж, 2013.- ВГАУ. – С.32-35.

30. Гулевский, В.А. Возможности водоиспарительного охлаждения воздуха животноводческих помещений/ В.А. Гулевский, В.П. Шацкий// MATERIALY IX MIEDZYNARODOWEJ NAUKOWI-PRAKTYCZNEJ KONFERENCJI «PERSPEKTYWICZNE OPRACOWANIA SA NAUKA I TECHNIKAMI - 2013» volume 32. Rolnictwo: Przemysl. Nauka I studia. – С. 28 – 32.

31. Гулевский, В.А. Проект: «Водоиспарительный охладитель воздуха» / В.А. Гулевский, В.П. Шацкий// Справочник инновационных разработок ВУЗов Российской Федерации. Белгород, 2013 – С.46 – 47.

32. Гулевский, В.А. Моделирование процесса охлаждения молока противоточными пластинчатыми теплообменниками / В.А. Гулевский, В.П. Шацкий// Материалы научной конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов «Инновационные технологии и технические средства для АПК», Воронеж, 2013.- ВГАУ. – С.32-35.

33. Гулевский, В.А. Тепловой баланс птицеводческих помещений. Материалы международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Инновационные технологии и технические средства для АПК», Воронеж, 2014.- ВГАУ. – С.46-54

34. Гулевский, В.А. Экологичные технологии охлаждения воздуха / В.А. Гулевский, В.П. Шацкий, Л.И. Федулова // Эколого-ресурсосберегающие технологии и системы в лесном хозяйстве. Международная научно-техническая конференция. – Воронеж. – ВГЛТА, 2014. №3, ч.4. С. 422 – 426.

35. Гулевский, В.А. Моделирование работы пластинчатых теплообменников-рекуператоров / В.А. Гулевский, В.П. Шацкий, Н.Г. Спирина // Эколого-ресурсосберегающие технологии и системы в лесном хозяйстве. Международная научно-техническая конференция. – Воронеж. – ВГЛТА, 2014. №3, ч.2. С. 323 – 327.

Просим принять участие в работе диссертационного совета Д 220.010.04 или выслать Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах с заверенными подписями по адресу: 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, д. 13, учёному секретарю. Телефон (473) 253-75-35, e-mail: et@agroeng.vsau.ru.

Гулевский Вячеслав Анатольевич
НОРМАЛИЗАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ
ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ ПТИЦЕВОДЧЕСКИХ ПОМЕЩЕНИЙ ПУТЕМ
ОБРАБОТКИ ВОЗДУХА ПЛАСТИНЧАТЫМИ ТЕПЛООБМЕННИКАМИ

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени доктора технических наук

Подписано в печать 27.02.2015 . Формат 60x90¹/₁₆. Бумага офсетная.
Усл. п.л. 1,0. Гарнитура Таймс. Тираж 110 экз. Заказ 11614.