

На правах рукописи



Кучеренко Мария Николаевна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ И  
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
ПАРАМЕТРОВ МИКРОКЛИМАТА**

05.23.03 – Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газо-  
снабжение и освещение

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Пенза – 2018

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тольяттинский государственный университет»

Научный консультант: доктор технических наук, профессор  
**Бодров Валерий Иосифович**

Официальные оппоненты: **Калашников Михаил Петрович**, доктор технических наук, профессор, декан Строительного факультета ФГБОУ ВО «Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления».

**Гримитлин Александр Моисеевич**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский архитектурно-строительный университет», профессор кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция»

**Ильина Татьяна Николаевна**, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», профессор кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», г. Тюмень

Защита состоится 2 ноября 2018 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д. 212.184.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства», по адресу: 440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28, 1 корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства» и на сайте <http://dissovet.pguas.ru/>.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Бикунова Марина Викторовна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Повышение энергоэффективности систем обеспечения микроклимата (СОМ) в зданиях и сооружения различного назначения, включающее полное использование высокопотенциальной и низкопотенциальной искусственно генерируемой энергии, является основой энергетической стратегии в Российской Федерации. Снижение энергоемкости сельскохозяйственного производства в условиях политики импортозамещения имеет приоритетное значения для развития экономики страны.

Системный анализ подходов по совершенствованию аэродинамических и теплофизических показателей энергоэффективных жилых и производственных сельскохозяйственных зданий и сооружений показал невозможность применения на практике имеющихся отечественных и зарубежных моделей оптимизации их энергетических и теплофизических характеристик. Применяемые инженерные решения по энергосбережению и поддержанию нормируемых параметров микроклимата не рассматриваются системно, а заменяются конкретным решением поддержания отдельных частных параметров без рассмотрения факторов взаимного влияния применяемых мероприятий.

В настоящее время отсутствует единый подход к методам аэродинамического расчета систем вентиляции. Существующая практика проектирования вентиляционных систем многоквартирных жилых домов, как правило, предполагает расчет системы естественной вентиляции на краевые, необоснованные условия эксплуатации. Это связано с тенденцией к снижению капитальных затрат, а также неоднозначностью существующих методик расчета и отсутствием единой нормативной методологии, учитывающей способы организации воздухообмена, этажность и объемно-планировочные решения зданий, режимы эксплуатации систем обеспечения параметров микроклимата.

Расчеты систем обеспечения параметров микроклимата производственных сельскохозяйственных зданий в настоящее время проводятся по общепринятым нормам и закономерностям для гражданских и промышленных зданий. Однако они практически не учитывают биологическую активность продукции, специфические биолого-ветеринарные, теплофизические, технологические и энергетические требования, предъявляемые к системам обеспечения микроклимата сельскохозяйственных зданий. Результатом являются непредсказуемые отклонения реальных параметров воздуха в помещениях от расчетных, необоснованное завышение установочных мощностей систем.

Нормирование и расчет систем активной вентиляции при хранении и заготовке грубых кормов вообще не вошли в строительные нормы и правила. Это относится и к вентиляции подземных пешеходных переходов под автомобиль-

ными дорогами при обустройстве в них объектов с постоянными рабочими местами.

Снижение энергоемкости сооружений и технологических установок должно достигаться путем полной утилизации биологической, физиологической и технологической теплоты, а также за счет научного и технико-экономического обоснования и практического уточнения областей применения естественных и искусственных источников энергии, оптимизации режимов работы инженерного оборудования применительно к конкретному климатическому региону страны.

Таким образом, проблема разработки научно-методологических основ нормирования и расчета аэродинамических и теплофизических показателей систем обеспечения параметров микроклимата энергоэффективных зданий и сооружений различного назначения актуальна и имеет важное научное, практическое и социальное значение.

### **Степень разработанности темы исследований**

Теоретическими основами диссертационного исследования являются работы, посвященные вопросам теории и практики создания пассивных и активных систем обеспечения микроклимата зданий и сооружений (в том числе сельскохозяйственных) зарубежных и отечественных ученых В.Н. Богословского, В.И. Бодрова, В.М. Валова, В.Г. Гагарина, А.Н. Гвоздкова, М.И. Гримитлина, А.М. Гримитлина, М.М. Грудзинского, П.И. Дячека, А.Г. Егиазарова, В.З. Жадана, М.П. Калашникова, П.Н. Каменева, В.Е. Константиновой, С.В. Корниенко, Ю.Я. Кувшинова, И.Ф. Ливчака, А.В. Лыкова, Е.Г. Малявиной, Л.М. Махова, А.В. Нестеренко, А.Г. Перехоженцева, Г.М. Позина, Э.В. Сазонова, Е.И. Тертичника, В.П. Титова, К.Ф. Фокина и др.

Однако эти исследования преимущественно направлены на изучение отдельных показателей эффективности элементов систем обеспечения микроклимата и комплексно не учитывают особенности формирования микроклимата. Приведенные в рассмотренных работах данные имеют различную степень проработанности, базируются на различных методах и понятиях и не могут в полной мере обеспечить повышение энергоэффективности систем обеспечения параметров микроклимата.

Снижение энергопотребления и повышение обеспеченности параметров микроклимата возможно только за счет комплексного учета аэродинамических и теплофизических показателей систем обеспечения микроклимата, а также взаимосвязи объемно-планировочных решений и особенностей протекания процессов тепломассопереноса. Реализации данного направления посвящены научные исследования диссертации.

Диссертационная работа выполнялась в рамках постановления Правительства РФ №1081 «О неотложных мерах по энергосбережению», Указа Президента РФ «О некоторых мерах по повышению энергетической и экологической эффективности Российской экономики» от 4 июня 2008 г. Результаты исследований явились базовой основой Аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы»: 1.4.07 «Разработка термодинамического обоснования решения задачи влагопереноса в слое биологически активной продукции», №ГР 01200703967, 2007-2008 г.г.; 1.1.09 «Теоретические исследования по термодинамическому обоснованию методов и средств обеспечения параметров микроклимата в сельскохозяйственных сооружениях», №ГР 01200902466, 2009-2012 г.г.; 7.4513 «Разработка и научное обоснование методологического подхода по совершенствованию энергоэффективности систем обеспечения параметров микроклимата с учетом аэродинамических и теплофизических закономерностей процессов теплообмена и влагопереноса», №ГР 01201256977, 2013-2014 г.г.; 2014/132 «Разработка и научное обоснование теплофизических закономерностей переноса теплоты и влаги в неотапливаемых производственных сельскохозяйственных зданиях, №ГР 01201458429, 2014-2016 г.г.

**Цель исследований.** Методологическое обоснование и развитие системных методов нормирования и расчета аэродинамических и теплофизических характеристик систем обеспечения параметров микроклимата энергоэффективных гражданских и производственных сельскохозяйственных зданий и сооружений как единых биоэнергетических комплексов в круглогодичном цикле эксплуатации.

**Задачи исследований.** Достижение поставленной цели реализуется путем решения следующих задач:

– научное обоснование и создание методологии нормирования и расчета пассивных и активных элементов систем обеспечения параметров микроклимата энергоэффективных гражданских и сельскохозяйственных зданий и сооружений;

– разработка математической модели вентиляционной системы многоквартирного жилого дома и получение на основе аналитических и натурных исследований конкретных аэродинамических характеристик и рациональных областей применения естественной, механической или комбинированной вентиляции;

– аналитическое, экспериментальное и натурное обоснование методики расчета обеспеченности температурного и воздушного режимов в подземных пешеходных переходах с постоянными рабочими местами за счет естественных источников энергии;

– разработка уточненной теплофизической модели динамики переноса теплоты и влаги в слое биологически активной продукции на основе полного термодинамического потенциала переноса фаз (потенциала влажности) с получением функциональных аналитических зависимостей;

– научное обоснование и разработка метода расчета на  $I-d-\theta$ - диаграмме влажного воздуха интенсивности тепломассопереноса и параметров термодинамического равновесного состояния в системе «влажный воздух – биологически активная продукция» в процессах сушки и хранения;

– обоснование системного подхода к нормированию и расчету теплотехнических и влажностных характеристик теплового контура производственных сельскохозяйственных зданий и сооружений;

– разработка, реализация и оценка объемно-планировочных и инженерно-технологических решений по повышению обеспеченности параметров микроклимата энергоэффективных гражданских и производственных сельскохозяйственных зданий и сооружений в круглогодичном цикле эксплуатации.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в следующем:

1. Теоретически и экспериментально обоснован методологический подход к нормированию и расчету аэродинамических и тепломассообменных характеристик систем обеспечения параметров микроклимата гражданских и сельскохозяйственных зданий и сооружений как особых классов зданий при использовании естественных и искусственных источников энергии.

2. На основе аэродинамического условия работоспособности системы естественной вентиляции разработана физико-математическая модель для расчета фактической производительности вентиляционных каналов в многоквартирных жилых домах в круглогодичном цикле эксплуатации.

3. С применением закономерностей аэродинамики и результатов экспериментальных исследований получены математические зависимости для определения параметров процесса естественного переноса массы воздуха в подземных пешеходных переходах, а также значения коэффициентов обеспеченности нормируемого воздухообмена в подземных пешеходных переходах при естественных источниках энергии.

4. На основе фундаментальных положений термодинамики получены аналитические зависимости по определению полного потенциала переноса (потенциала влажности), а также разработана теплофизическая модель процесса тепломассопереноса в биологически активных средах.

5. Установлены количественные показатели интенсивности процессов тепломассопереноса в слое биологически активной продукции на основе полного термодинамического потенциала переноса, в том числе при противоположных

требованиях к конечному равновесному состоянию (сохранение влаги в продукции или ее сушка).

6. Теоретически и экспериментально обоснованы основные положения системного подхода к разработке методики нормирования теплофизических характеристик теплового контура производственных сельскохозяйственных зданий и сооружений. Определены коэффициенты влагопроводности конструкций теплового контура зданий и показатели интенсивности влагообмена на поверхностях наружных ограждений для нахождения оптимальных способов поддержания требуемых параметров внутреннего микроклимата.

**Теоретическая и практическая значимость.** Для гражданских и сельскохозяйственных зданий и сооружений, как самостоятельного класса объектов по формированию параметров микроклимата, разработаны новые теоретические подходы для комплексного проектирования и расчёта аэродинамических и теплофизических показателей, определяющих энергоэффективность режимов эксплуатации СОМ в круглогодичном цикле.

Практическую ценность при проектировании, конструировании и реконструкции систем обеспечения параметров микроклимата имеют методики расчетов: уточненная инженерная методика аэродинамического расчета систем естественной вентиляции многоквартирных жилых домов; графоаналитический метод расчета интенсивности процессов тепломассообмена в слое биологически активного сырья с использованием  $I-d-\theta$ -диаграммы влажного воздуха; системный подход к расчету и оценке теплотехнических и влажностных характеристик теплового контура зданий; рекомендации по повышению энергоэффективности систем обеспечения параметров микроклимата при использовании естественной и искусственно генерируемой тепловой энергии.

Выполнена теоретическая и экспериментальная оценка режимов работ комбинированных естественно-механических систем вентиляции многоквартирных жилых домов, систем активной вентиляции при хранении или сушке биологически активной продукции; обоснованы условия обеспечения требуемых воздухообменов в подземных пешеходных переходах в круглогодичном цикле эксплуатации; установлены оптимальные теплотехнические и влажностные показатели наружных ограждений в процессе эксплуатации сельскохозяйственных зданий.

Представленные в работе инженерные методики расчета нормирования и расчета пассивных и активных элементов систем обеспечения микроклимата с преобладающим использованием естественных источников энергии, рекомендации по оптимизации работы систем вентиляции производственных сельскохозяйственных зданий и сооружений и реконструкции теплового контура использованы в практике проектирования и эксплуатации на сельскохозяйствен-

ных предприятиях Поволжья. Предлагаемые автором методики и рекомендации по обеспечению требуемых воздухообменов в гражданских зданиях и сооружениях апробированы в проектных организациях и получили положительные отзывы.

Акты внедрения результатов диссертационных исследований свидетельствуют о значительном экономическом эффекте (более 45 млн. руб. в ценах 2016 г.).

**Методология и методы исследования.** Методологической основой диссертационного исследования являются аналитическое обобщение известных научных теоретических результатов, фундаментальные положения аэродинамики, тепломассообмена, технической термодинамики и строительной теплофизики. Научные исследования проводились с применением современных математических методов планирования и обработки экспериментальных данных. Экспериментальные исследования основываются на общепринятых методах физического моделирования в лабораторных и натурных условиях.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Методология выделения гражданских и сельскохозяйственных зданий и сооружений в особые классы по нормированию и расчету аэродинамических и тепломассообменных характеристик систем обеспечения параметров микроклимата при использовании естественных и искусственных источников энергии.

2. Уточненная методика расчета аэродинамических характеристик систем вентиляции многоквартирных жилых домов с теплыми чердаками и теоретическое обоснование рациональных областей применения естественных и механических побудителей движения воздуха в круглогодичном цикле эксплуатации.

3. Теоретическое и экспериментальное обоснование движущих сил переноса массы воздуха и коэффициентов обеспеченности нормируемого воздухообмена в подземных пешеходных переходах при естественных источниках энергии в круглогодичном цикле эксплуатации.

4. Термодинамическое обоснование графо-аналитического решения задачи влагопереноса в слое биологически активной продукции, позволяющие уточнить теплофизические модели процессов тепломассопереноса в слое растительного сырья при сушке и хранении с позиции полного термодинамического потенциала (потенциала влажности).

5. Методики расчета количественных показателей интенсивности тепломассопереноса в слое растительного сырья, позволяющие оптимизировать режимы работы систем обеспечения параметров микроклимата при сушке и



хранении для достижения максимальной сохранности продукции при минимальном потреблении энергии.

6. Аналитический способ определения коэффициентов теплопроводности конструкций теплового контура зданий и показателей интенсивности влагообмена на поверхности наружных ограждений в шкале потенциала влажности.

7. Комплексный метод нормирования и расчета сопротивления влагопередаче в шкале потенциала влажности по нормируемому удельному потоку влаги через наружные ограждения неотапливаемых производственных сельскохозяйственных зданий, включающий аналитическое определение коэффициента влагообмена на внутренних поверхностях наружных ограждений.

### **Достоверность результатов диссертационной работы**

Достоверность полученных научных результатов, выводов и рекомендаций обеспечивается: правомочностью сделанных допущений; использованием фундаментальных положений аэродинамики и тепломассообмена; применением современных математических методов планирования экспериментов и статистической обработки результатов; использованием метрологически обеспеченной измерительной аппаратуры; удовлетворительной сходимостью результатов аналитических расчетов с данными, полученными экспериментальным путем.

### **Апробация работы**

Основные положения и результаты исследований докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава и аспирантов и студентов Нижегородского государственного архитектурно-строительного университета (2003...2005 г.), на III (2004 г.) и XI (2013 г.) международных научных конференциях «Качество внутреннего воздуха и окружающей среды», г. Волгоград, на VIII международной научно-практической конференции «Экология и жизнь», г. Пенза (2005 г.), на международной научно-технической конференции «Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов» (2009 г., 2012 г.), г. Тольятти, на всероссийской научно-практической конференции «Энерго- и ресурсосбережение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии» (2009 г., 2010 г.), г. Екатеринбург, на международной научно-практической конференции «Строительство-2012» (2012 г.), г. Ростов на Дону, на V международной научно-технической конференции «Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции» (2013 г.), г. Москва.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 52 работы, в том числе 3 статьи индексируемых Scopus, 19 статей в журналах, рекомендуемых ВАК, 2 монографии и одно учебное пособие.

**Личный вклад автора** заключается в формулировании общей идеи и цели работы, в разработке методологии и методов теоретических и экспериментальных исследований, в выполнении части лабораторных и натурных исследований, обобщении их результатов и выдаче практических рекомендаций. В рамках работы над диссертацией автор подготовил в качестве научного руководителя трех кандидатов технических наук.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа изложена на 311 страницах машинописного текста и состоит из введения, 6 глав, основных выводов, списка использованной литературы и 13 приложений. Список использованной литературы включает 340 наименования работ, в том числе 36 зарубежных авторов. Иллюстрационный материал содержит 160 рисунков, 27 таблиц в тексте. В приложениях и в тексте диссертации приведены первоначальный и обработанный цифровой и графический материал по результатам лабораторных и натурных исследований, акты внедрения и справки по практической реализации результатов исследований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, научная новизна и практическая значимость работы, основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** рассмотрены аэродинамические и термодинамические основы работы систем обеспечения микроклимата зданий и сооружений. Представлены результаты аналитического обзора опубликованных работ по нормированию и тепловлажностному расчету пассивных элементов систем обеспечения микроклимата, инженерных расчетов режимов работы СОМ в многоэтажных жилых зданиях, подземных пешеходных переходах и производственных сельскохозяйственных зданиях.

Системный анализ современного состояния повышения энергоэффективности зданий и сооружений выявил отсутствие единого методологического подхода по снижению потребления энергии как пассивными (тепловой контур), так и активными (системы вентиляции, отопления, кондиционирования, холодоснабжения) элементами систем обеспечения параметров микроклимата, в том числе за счет преобладающего использования естественных источников энергии. Для выявления перспективных путей проектирования и расчета энергоэффективных систем обеспечения микроклимата зданий и сооружений различного назначения требуются дополнительные комплексные теоретические, экспериментальные и натурные исследования.

Системный подход к выявлению динамики и закономерностей формирования параметров микроклимата приводит к необходимости выделения жилых зданий, подземных пешеходных переходов и производственных сельскохозяйственных зданий и сооружений в отдельные самостоятельные классы по нормированию и расчету энергоэффективных систем обеспечения оптимальных и допустимых параметров внутреннего воздуха. Специфические особенностями формирования комфортной среды в рассматриваемых помещениях представлены на рисунке 1.



Рисунок 1 – Особенности формирования микроклимата в зданиях и сооружениях различного назначения

Разработанный методологический подход к созданию систем обеспечения параметров микроклимата помещений, энергоэффективных зданий и сооружений в целом основан на объединении в единый комплекс энергетических систем и объемно-планировочных решений. В этом случае динамика формирования параметров микроклимата зависит одновременно от пассивных (тепловой контур здания) и активных (отопление, холодоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха) систем обеспечения параметров микроклимата.

Особенности динамики формирования параметров микроклимата в производственных сельскохозяйственных зданиях показывают, что температурный, влажностный и воздушный режимы помещений и наружных ограждений данного класса зданий не могут быть рассчитаны по рекомендуемым методикам для гражданских и промышленных зданий. Для создания и поддержания расчетного температурно-влажностного режима помещений пассивными системами обеспечения параметров микроклимата необходимыми теплофизическими условиями являются поддержание в круглогодичном режиме постоянными как расчетных значений сопротивлений теплопередаче, так и величин сопротивлений паропроницаемости. Только сочетание обоих факторов обеспечивает постоянство влажностных режимов наружных ограждений. Выбор режимов работы активных систем обеспечения микроклимата, в свою очередь, должен базироваться на анализе обеспеченности теплофизических показателей теплового контура зданий.

Важным резервом повышения энергоэффективности гражданских зданий и сооружений является научно-практическое обоснование областей применения естественной и механической вентиляции. Для многоквартирных жилых домов отсутствует единая методика расчета систем канальной естественной вентиляции, учитывающая наличие в здании теплого чердака. Внедрение систем механической вытяжной вентиляции недостаточно подтверждено с теоретической, практической, экономической и конструктивной точек зрения. Создание допустимых температурно-влажностных и воздушных режимов в подземных пешеходных переходах возможно при решении задачи по выявлению и количественному обоснованию движущих сил переноса масс воздуха по тоннелям переходов.

Физическую картину динамики процессов смешения и деления потоков в полном объеме раскрывает теория смешивания потоков профессора П.Н. Каменева. Она является основой для получения аналитических количественных характеристик аэродинамических показателей отдельных узлов и систем в целом.

Анализ теоретических и экспериментальных исследований выявил отсутствие теплофизической модели и термодинамического обоснования динамики максимальной (при сушке) и минимальной (при хранении) интенсивности влагообмена в слое биологически активной продукции.

С точки зрения термодинамики, наиболее точно оценка тепломассообменных процессов в слое биологически активной продукции проводится с позиции теории потенциала влажности. Основным преимуществом данной теории является возможность описания процесса одним уравнением, учитывающим влияние температуры на тепло- и влагообмен как при изотермических, так и при неизотермических условиях. Для разработки методики расчета тепломассо-

обмена в слое растительного сырья, являющейся практическим приложением этой теории и позволяющей более широко применять понятие потенциала влажности в инженерных расчетах процессов сушки и хранения, необходимо изучение влияния различных факторов на коэффициент массообмена  $\alpha_\theta$  и разность потенциалов  $\Delta\theta$  и определение их количественных значений. Также требует термодинамического обоснования линии постоянных потенциалов  $\theta = \text{const}$  на  $I-d-\theta$ -диаграмме в области положительных температур.

Проектирование строительных конструкций на основе теории потенциала влажности затруднено отсутствием для большинства строительных материалов теплофизических характеристик в шкале потенциала влажности.

**Во второй главе** представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований по совершенствованию и апробации на практике методики расчета систем естественной вентиляции многоэтажных жилых зданий (МЖД) с теплыми чердаками, на основании которой предложены способы повышения эффективности работы систем вытяжной вентиляции.

Для аналитической оценки эффективности работы системы вытяжной естественной вентиляции МЖД разработана физико-математическая модель, позволяющая определить фактические производительности вентиляционных каналов  $L_\phi$ , м<sup>3</sup>/ч, при любых исходных условиях (количество этажей, размеры каналов, параметры наружного и внутреннего воздуха).

Условием стабильной работы естественной системы приточно-вытяжной вентиляции является выполнение равенства, Па:

$$\sum p_j^n = p_r^n + p_b^n, \quad (1)$$

где  $\sum p_j^n$  – суммарные потери давления на  $j$ -х участках вентканала, определяемые в зависимости от характера местного сопротивления, Па;  $p_r^n$  – расчетное располагаемое гравитационное давление, Па;  $p_b^n$  – расчетное располагаемое ветровое давление, Па.

Определение фактической производительности вытяжных вентканалов,  $L_j$ , м<sup>3</sup>/ч, естественной системы вентиляции с вертикальным сборным коллектором заключается в нахождении фактических скоростей  $v_j$  в боковых ответвлениях решением системы уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum p^1 = p_r^1 + p_b^1; \\ \sum p_j^2 = p_r^2 + p_b^2; \\ \dots \\ \sum p^n = p_r^n + p_b^n. \end{array} \right. \quad (2)$$

где  $j = 1, 2 \dots n$ ;  $n$  – число этажей.

Система (2) представляет собой систему нелинейных алгебраических уравнений, аналитическое решение которой осуществляется методом итерации. В основе метода итерации лежит принцип сжимающих отображений.

Систему (2) можно привести к виду:

$$\begin{cases} L_1 = \varphi_1(L_1, L_2, \dots, L_n); \\ L_2 = \varphi_2(L_1, L_2, \dots, L_n); \\ \dots \\ L_n = \varphi_n(L_1, L_2, \dots, L_n). \end{cases} \quad (3)$$

Систему (3) можно записать в виде  $L = \varphi(L)$ , где  $L = \begin{pmatrix} L_1 \\ \vdots \\ L_n \end{pmatrix}$ ,  $\varphi(L) = \begin{pmatrix} \varphi_1(L) \\ \vdots \\ \varphi_n(L) \end{pmatrix}$ .

Пусть функции  $\varphi_i$  и  $\frac{\partial \varphi_i}{\partial L_j}$  ( $i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n$ ) определены и не-

прерывны в некоторой области  $G \subset R^n$ ,  $D$  – замкнутое ограниченное выпуклое множество, содержащееся в области  $G$ , причем  $\varphi(D) \subset D$ .

Если для системы (3) выполняется хотя бы одно из условий

$$\alpha_1 = \sqrt{\sum_{i=1}^n \max_{L \in D} \sum_{j=1}^n \left( \frac{\partial \varphi_i}{\partial L_j} \right)^2} < 1; \quad (4)$$

$$\alpha_2 = \sum_{i=1}^n \max_{1 \leq j \leq n} \max_{L \in D} \left| \frac{\partial \varphi_i}{\partial L_j} \right| < 1; \quad (5)$$

$$\alpha_3 = \max_{1 \leq i \leq n} \max_{L \in D} \sum_{j=1}^n \left| \frac{\partial \varphi_i}{\partial L_j} \right| < 1, \quad (6)$$

то данная система имеет в  $D$  единственное решение, которое можно с любой степенью точности найти методом итераций, выбирая в качестве  $L^0 = (L_1^0, L_2^0, \dots, L_n^0)$  произвольный элемент из  $D$  и полагая  $L^k = (L_1^k, L_2^k, \dots, L_n^k) = \varphi(L^{k-1}) = \varphi(L_1^{k-1}, L_2^{k-1}, \dots, L_n^{k-1})$  для  $k = 1, 2, \dots, K$ , где  $k$  – номер текущего члена итерационной последовательности, а  $K$  – число элементов данной последовательности, обеспечивающее требуемую точность приближенного решения.

Для численного решения в исследованиях использована функция «Поиск решения» программного пакета Microsoft Office Excel. В качестве целевой функции взято первое уравнение системы (2). Остальные уравнения выступают в качестве нелинейных ограничений для целевой функции.

Для проверки достоверности предложенной физико-математической модели проведены натурные замеры фактических воздухообменов в квартирах эксплуатируемых типовых (серия 90) 9-этажных жилых домах с теплым чердаком. Полученные экспериментальные данные по объемам удаляемого воздуха через вентиляционные системы санузлов и кухонь показали, что фактический объем удаляемого воздуха практически всегда не соответствует нормируемому (рисунок 2). Сравнительный анализ расчетных и натуральных данных значений воздухообмена в жилых зданиях показал значительное расхождение исследуемых величин. В качестве примера графические зависимости экспериментальных и расчетных значений расходов воздуха из кухонь приведены на рисунке 3.

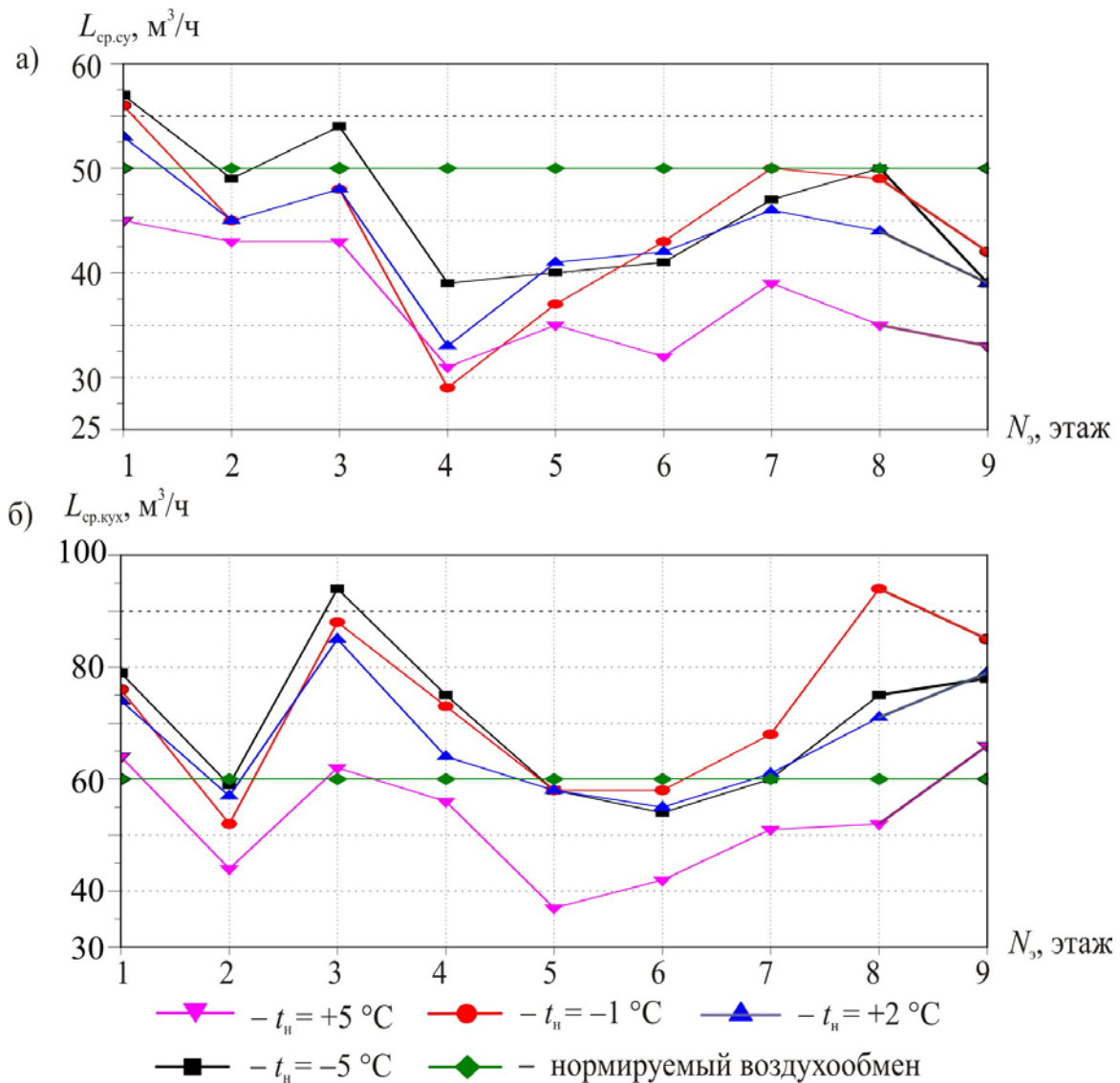


Рисунок 2 – Экспериментальные значения объемов удаляемого воздуха: а – из санитарных узлов; б – из кухонь

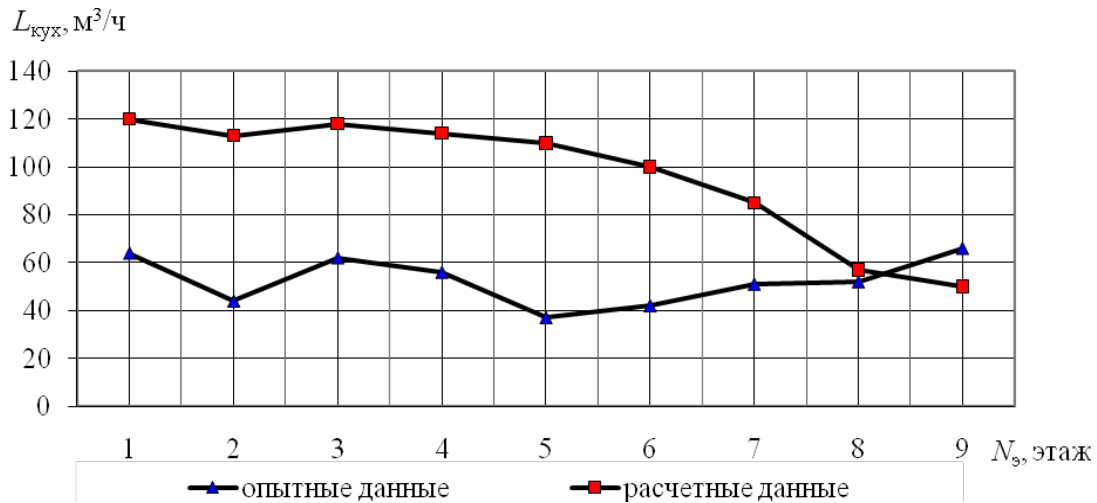


Рисунок 3 – Объемы удаляемого воздуха из кухонь при  $t_n = +5\text{ }^\circ\text{C}$

Несоответствие теоретических расчетов с практическими данными вызвано методическими недоработками аэродинамического расчета систем вентиляции с естественным побуждением в зданиях с теплыми чердаками. В стандартных методиках аэродинамического расчета системы естественной вентиляции представляются как единые с общими камерами статического давления, которыми являются теплые чердаки. Располагаемое давление  $p_{\text{расп}}$ , Па, для них находится с учетом общей высоты от центра вытяжного отверстия в помещении до верха устья вытяжной шахты  $H$ , м. В действительности реальное располагаемое давление меньше полученного в ходе расчетов по данной методике. Этот факт объясняется тем, что теплый чердак, имеющий большой по сравнению с вытяжными каналами объем, не может считаться просто камерой статического разрежения.

Наличие большого объема воздуха, теплообмена с атмосферным воздухом, поступления и удаления теплоты с воздухом вытяжных систем естественной вентиляции здания приводит к разделению единой системы вентиляции на две. Первая система – «жилое помещение – теплый чердак» высотой  $H_1$ , м, вторая система – «теплый чердак атмосферный воздух» высотой  $H_2$ , м. Общее располагаемое давление в предлагаемой схеме определяется как сумма величин давлений для вентиляционных стояков и общей вытяжной шахты (рисунок 4):

$$p_{\text{расп}} = H_1 \cdot \left( \frac{353}{273 + t_{\text{ч}}} - \frac{353}{273 + t_{\text{в}}} \right) \cdot g + H_2 \cdot \left( \frac{353}{273 + t_{\text{н}}} - \frac{353}{273 + t_{\text{ч}}} \right) \cdot g. \quad (7)$$

Температуру воздуха в пределах чердака можно определить из системы уравнений теплового и воздушного балансов по зависимости:



$$t_{\text{ч}} = \frac{t_{\text{в}} \cdot k_{\text{покр}} \cdot F_{\text{пер}} + t_{\text{н}} (k_{\text{ст}} \cdot F_{\text{ст}} + k_{\text{кров}} \cdot F_{\text{кров}}) + 98 \left( L_{\text{су}} + L_{\text{кух}} - 273 \cdot \frac{L_{\text{су}}}{273 + t_{\text{су}}} - 273 \cdot \frac{L_{\text{кух}}}{273 + t_{\text{кух}}} \right)}{98 \cdot \left( \frac{L_{\text{су}}}{273 + t_{\text{су}}} + \frac{L_{\text{кух}}}{273 + t_{\text{кух}}} \right) + k_{\text{покр}} \cdot F_{\text{покр}} + k_{\text{ст}} \cdot F_{\text{ст}} + k_{\text{кров}} \cdot F_{\text{кров}}}, \quad (8)$$

Где  $t_{\text{в}}$ ,  $t_{\text{н}}$ ,  $t_{\text{су}}$ ,  $t_{\text{кух}}$  – температура воздуха соответственно внутри помещений квартир, наружного, в санитарных узлах, кухнях, °C;  $k_{\text{покр}}$ ,  $k_{\text{ст}}$ ,  $k_{\text{кров}}$  – коэффициенты теплопередачи ограждающих конструкций соответственно перекрытий верхних этажей, наружных стен, кровли, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $F_{\text{покр}}$ ,  $F_{\text{ст}}$ ,  $F_{\text{кров}}$  – площади поверхностей ограждающих конструкций соответственно перекрытий верхних этажей, наружных стен, кровли, м<sup>2</sup>;  $L_{\text{су}}$ ,  $L_{\text{кух}}$  – объемы воздуха, поступающего в помещения чердаков соответственно из санитарных узлов и кухонь, м<sup>3</sup>/ч.

Значения температуры воздуха в теплом чердаке, полученные в результате натурального эксперимента и рассчитанные по (8) представлены в виде графика на рисунке 5.

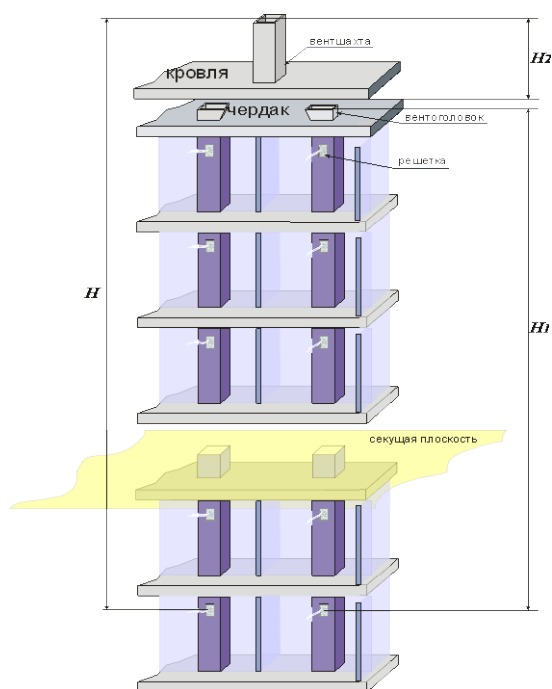


Рисунок 4 – Схема определения предполагаемого давления

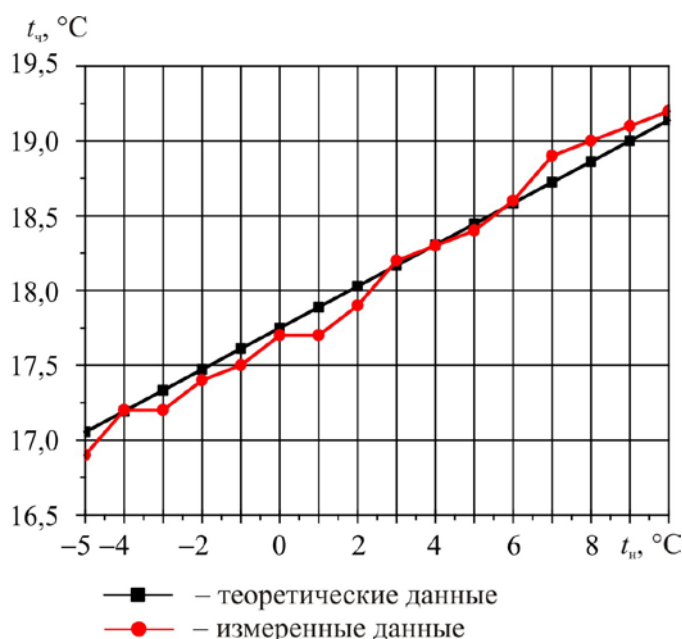


Рисунок 5 – Изменения температуры воздуха на чердаке

Имеется достаточная сходимость результатов, невязка не превышает 5...7 %. С достаточной для инженерных расчетов точностью может быть использована зависимость:

$$t_{\text{ч}} = 17,75 + 0,139 \cdot t_{\text{н}}. \quad (9)$$

По уточненной методике был проведен аэродинамический расчет систем естественной вентиляции 9-этажного жилого дома. Анализ результатов расчета показал, что воздухообмен, рассчитанный по разработанной методике,

находится в одном численном диапазоне с данными, полученными в ходе натуральных измерений.

Для автоматизированного аэродинамического расчета по предложенной методике разработан алгоритм компьютерной программы.

С понижением температуры наружного воздуха величина избыточного давления увеличивается, что теоретически улучшает работу системы. Согласно выполненным расчетам, для исследуемого 9-этажного здания с теплым чердаком при температуре  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  фактические расходы превышают нормируемые в 1,4 раза, а при  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  – в 1,6 раза. Такое значительное увеличение объемов удаляемого воздуха не является положительным показателем работы системы, поскольку сохранение воздушного баланса в квартирах осуществляется за счет увеличения объемов инфильтрующегося воздуха, и, соответственно, увеличению затрат теплоты на его нагрев. Сохранение теплового баланса квартиры в данном случае возможно либо за счет увеличения теплоступлений от системы отопления, либо за счет снижения температуры внутреннего воздуха:

$$Q_{с.о} + Q_{быт} - Q_{пот} - Q_{инф} = 0, \quad (10)$$

где  $Q_{с.о}$  – теплоступления от системы отопления, Вт;  $Q_{быт}$  – бытовые теплоступления, Вт;  $Q_{пот}$  – теплотери через ограждающие конструкции, Вт;  $Q_{инф}$  – затраты теплоты на нагрев инфильтрующегося воздуха, Вт.

Обеспечение нормальной работы системы вентиляции в теплый период, снижение поэтажной неравномерности, а также снижение затрат на нагрев инфильтрационного воздуха при низких температурах наружного воздуха возможно только за счет внедрения комбинированной естественно-механической системы вентиляции.

Используя предложенную физико-математическую модель, были аналитически определены значения ожидаемых воздухообменов в диапазоне температур наружного воздуха от  $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ . На основе полученных данных построена режимная карта работы системы комбинированной естественно-механической системы вентиляции (рисунок 6). Показателем эффективности работы системы естественной вентиляции является отношение осредненного по этажам значения фактического расхода удаляемого воздуха  $L_{ср}$ ,  $\text{м}^3/\text{ч}$ , к нормируемому расходу  $L_{норм}$ ,  $\text{м}^3/\text{ч}$ , для заданной температуры воздуха  $t_n$ ,  $^{\circ}\text{C}$ .

Составление режимной карты работы системы вентиляции с выделением температурных диапазонов работы систем механической и естественной вентиляции позволит обеспечить требуемые санитарно-гигиенические условия в квартирах при круглогодичной эксплуатации системы, а также свести к минимуму энергетические затраты.

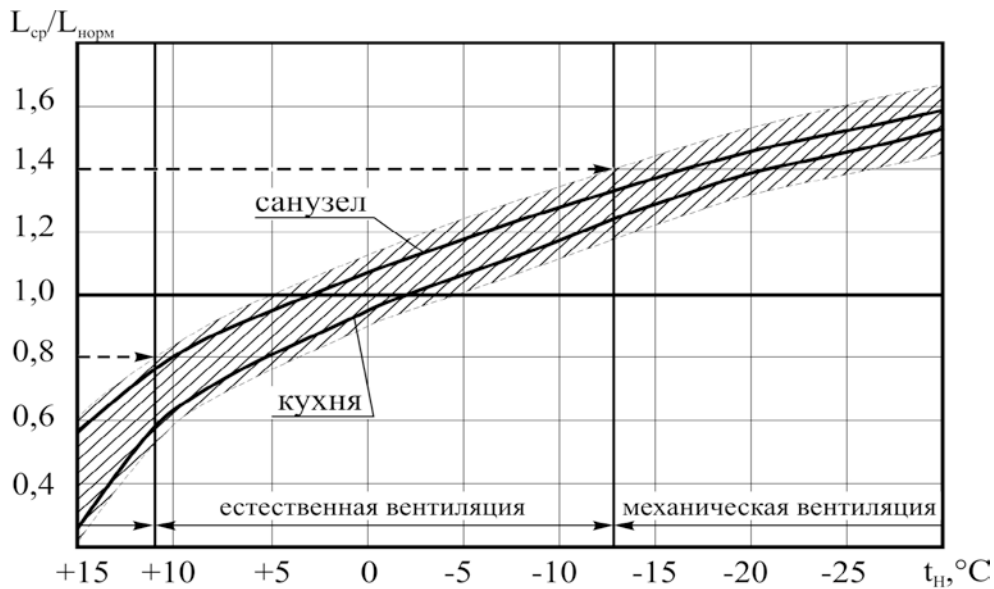


Рисунок 6 – Режимная карта работы системы вентиляции

Нижняя граница использования естественной вентиляции обусловлена допустимым отклонением значений воздухообменов от нормируемых, верхняя – экономической целесообразностью применения механической вентиляции. Экономическая целесообразность использования механической вентиляции в холодный период года определяется для каждого района строительства отдельно с учетом продолжительности стояния температур.

Таким образом, применение комбинированных (естественно-механических) систем вентиляции при реконструкции жилых зданий массовой застройки позволит стабилизировать работу системы в круглогодичном диапазоне и исключить дополнительные затраты теплоты на нагрев инфильтрующегося воздуха при низких температурах наружного воздуха.

**В третьей главе** изучены отсутствующие в современной нормативной и справочной литературе инженерные решения и рекомендации по возможности размещения в подземных пешеходных переходах постоянных рабочих мест без установки дополнительных специальных систем обеспечения допустимых параметров микроклимата.

Воздухообмен в тоннелях переходов происходит за счет естественных перепадов давлений (рисунок 7). Вентиляция (аэрация) тоннелей осуществляется за счет гравитационного  $\Delta p_t = h_t(\rho_n - \rho_v)g$ , Па, и ветрового  $\Delta p_v = v_v^2 \rho_n / 2$ , Па, давлений или их алгебраической суммы, равной полному естественному давлению  $\Delta p_e = \Delta p_t + \Delta p_v$ , Па. Здесь  $h_t$  – глубина заложения тоннеля, м;  $\rho_n$  и  $\rho_v$  – плотность наружного воздуха и воздуха в тоннеле,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $v_v$  – расчетная скорость наружного воздуха, м/с.

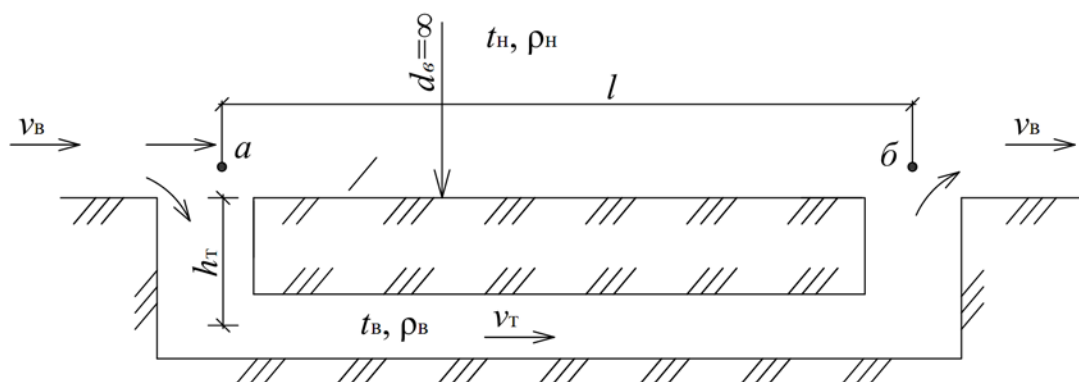


Рисунок 7 – Расчетная схема тоннеля подземного перехода

Анализ качественных и количественных показателей перепадов давлений, вызывающих устойчивое перемещение воздуха в переходах в круглогодичном цикле эксплуатации показал, что гравитационную составляющую  $\Delta p_t$  нельзя рассматривать в качестве устойчивого побудителя движения воздуха в тоннелях переходов. Расчет подвижности воздуха в тоннеле по методу удельных потерь давления не раскрывает физической картины динамики процессов при делении и слиянии потоков воздуха и приводит к неопределенности. Качественно и количественно величина движущей силы перемещения воздуха в тоннеле перехода обосновывается при рассмотрении динамики движения жидкости в пограничном слое.

Количество перемещаемого по тоннелю воздуха определялось экспериментально путем замеров значений аэродинамических коэффициентов на фронтальной (наветренной) и кормовой (заветренной) сторонах модели перехода (М 1:200) при ее продувке в аэродинамической трубе. Исследования проводились при отсутствии внешних препятствий потоку воздуха вдоль оси модели и при их наличии. В качестве препятствий использовались сплошные преграды и воздухопроницаемые преграды (сетки, имитирующие кусты, деревья) различной высоты, устанавливаемые под углами  $\alpha = 0^\circ; 30^\circ; 45^\circ; 60^\circ; 90^\circ$  к оси модели. Средняя скорость воздуха на рабочем столе варьировалась до 10,0 м/с. Полученные экспериментальные результаты скорости воздуха в тоннеле модели  $v_t$ , м/с, представлены в виде полиномиального уравнения:

$$v_t = a\alpha^4 + b\alpha^3 + c\alpha^2 + d\alpha + e. \quad (11)$$

Условия возникновения явления эжекции в порталах переходов проанализированы на основе теории движения потоков профессора П.Н. Каменева. Установлено, что явление эжекции на входах в подземный пешеходный переход наблюдается при угле обдува менее  $30^\circ$ , и, соответственно, не наблюдается на выходах из перехода. При увеличении угла обдува картина движения воздуха во входах-выходах меняется: эжекция на входах отсутствует и имеет место на выходах.

Анализ результатов экспериментальных исследований показал, что основным направлением повышения интенсивности естественной вентиляции (аэрации) тоннелей за счет ветрового давления является возведение сплошных искусственных плоских препятствий движению атмосферного воздуха у каждого портала (позиция 1 на рисунке 8). Они устанавливаются со стороны автомобильных трасс перпендикулярно оси тоннеля.

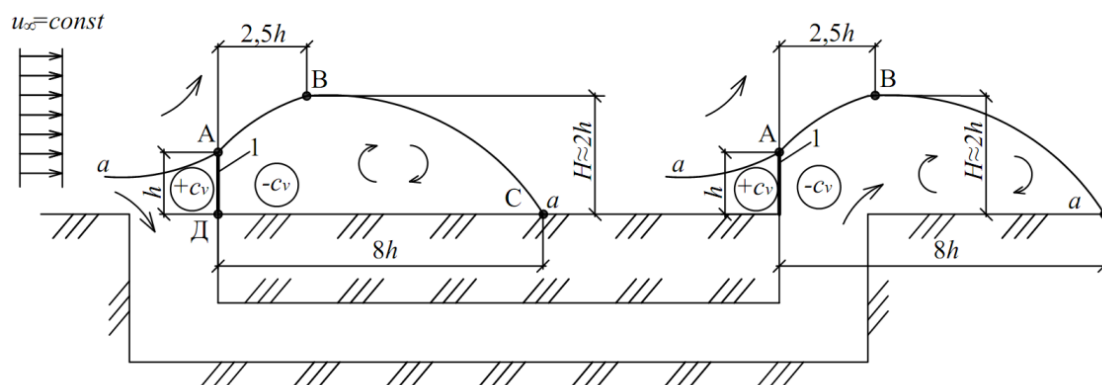


Рисунок 8 – Схема формирования зон аэродинамических коэффициентов

Поток воздуха, обтекающий препятствие высотой  $h$ , м, делится на две области течения с границей по линии  $a-a$ , проходящей через точку отрыва А. За препятствием ниже линии  $a-a$  располагается область течения с отрицательным аэродинамическим коэффициентом ( $-c_v$ ). Выше линии  $a-a$  поток воздуха невозмущенный. Максимальная высота области отрывного течения  $H \approx 2h$ , м, максимальная длина этой области (отрезок DC) равен приблизительно  $8h$ , м, горизонтальное расстояние от точки А до точки В составляет  $2,5h$ , м. При фронтальном обтекании препятствия на наветренной стороне  $c_v = 0,5 \dots 0,8$ , на заветренной  $c_v = -0,2 \dots -0,3$ .

Предложена инженерная методика расчета естественного воздухообмена в тоннеле перехода, позволяющая определить необходимость, тип и высоту препятствия для обеспечения нормируемых значений воздухообменов в тоннеле перехода.

Натурные замеры интенсивности воздухообменов проводились в тоннелях переходов в холодный и теплый периоды в г. Тольятти. Результаты натурных замеров подвижности воздуха в тоннелях сопоставлены с лабораторными значениями скоростей в модели перехода. Скорости воздуха в модели и в реальных переходах находятся в одном численном диапазоне при сопоставимых скоростях обдува модели и атмосферного воздуха.

Для количественной оценки эффективности естественной вентиляции тоннелей переходов принят коэффициент обеспеченности воздухообменов  $K_{об}$ . За расчетную принята подвижность воздуха в тоннеле  $v_T = 0,2$  м/с,  $L_p = 12\,960$  м<sup>3</sup>/ч.

С учетом розы ветров для г. Нижнего Новгорода и г. Тольятти получены графоаналитические зависимости коэффициентов  $K_{об}$ , доли, естественных воздухообменов в переходах в июле и январе месяцев. Изучаемые подземные переходы имеют приведенное выше простейшее объемно-планировочное решение, не имеют внешних препятствий у порталов. На рисунке 9 в качестве примера приведены зависимости величины  $K_{об}$  естественных воздухообменов при ориентации оси тоннеля С-Ю для теплого и холодного периодов года.

Обобщенные значения коэффициентов  $K_{об}$  сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Коэффициент обеспеченности естественного воздухообмена  $K_{об}$ , доли

Период года	Ориентация оси тоннеля			
	С-Ю	В-З	СВ-ЮЗ	СЗ-ЮВ
г. Нижний Новгород				
Теплый (июль)	0,68	0,76	0,78	0,74
Холодный (январь)	0,81	0,8	0,86	0,77
Г. Тольятти				
Теплый (июль)	0,78	0,83	0,81	0,82
Холодный (январь)	0,79	0,85	0,85	0,89

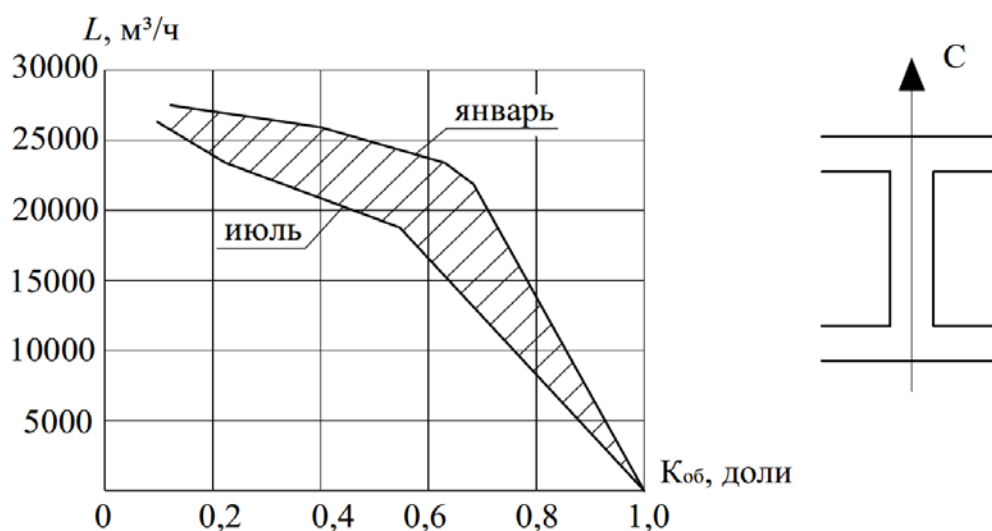


Рисунок 9 – Обеспеченность воздухообмена при ориентации оси тоннеля С-Ю

В таблице 1 приведены максимально возможные значения  $K_{об}$  за счет естественных источников энергии (ветрового давления) в тоннелях переходов при расчетной скорости ветра в регионе. Реальные величины коэффициентов лежат в пределах от нуля до приведенных в таблице. Установка внешних препятствий (рисунок 8) для увеличения поступающего в тоннель воздуха в реальных условиях возможно только в исключительных случаях. На рисунке 10 представлена векторная диаграмма, характеризующая обеспеченность воздухообмена в тоннеле перехода при наличии внешнего сплошного препятствия  $\bar{h}_{снл} = 2,86$ .

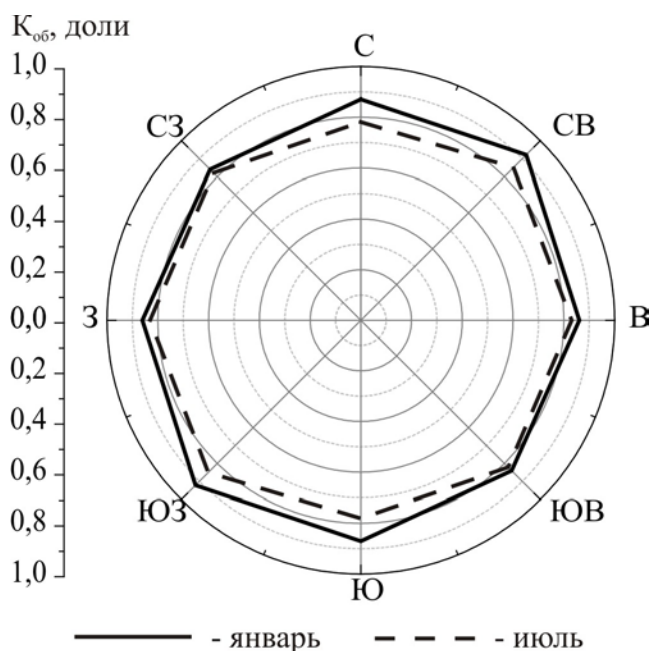


Рисунок 10 – Обеспеченность воздухообмена при наличии внешнего сплошного препятствия  $\bar{h}_{\text{спл}} = 2,86$

В то же время такое довольно сложное инженерное сооружение не может стабильно увеличить коэффициент обеспеченности  $K_{\text{об}}$  из-за переменных значений скорости и направления ветра. Возведение более сложных по объемно-планировочным решениям пешеходных переходов по сравнению с исследованными сопровождается снижением величины естественного воздухообмена и, соответственно, максимальной величины коэффициента обеспеченности, приведенного в таблице 1.

Таким образом, создание постоянных рабочих мест в подземных пешеходных переходах при формировании допустимых параметров микроклимата за счет естественных источников энергии не может быть рекомендовано. Естественная вентиляция (аэрация) не обеспечивает устойчивую круглогодичную подачу минимального количества наружного воздуха и температурный режим. Создание допустимых температурно-влажностных и воздушных режимов возможно только механической приточно-вытяжной вентиляцией с подогревом приточного воздуха.

**В четвертой главе приведено** термодинамическое обоснование графоаналитического решения задачи влагопереноса в слое биологически активного сырья с уточнением инженерных методик расчета интенсивности процессов тепловлагопереноса в процессах сушки и хранения.

Интенсивность влагообмена между влажной поверхностью сырья и воздухом в процессах сушки или хранения наиболее точно, с точки зрения термодинамики, может быть определена на основе теории потенциала влажности:

Поток влаги с поверхности влажного материала к продуваемому воздуху пропорционален разности потенциалов влажности:

$$j_{\theta} = \alpha_{\theta} (\theta_{\text{пов}} - \theta_{\text{в}}) \quad (12)$$

где  $\alpha_\theta$  – коэффициент влагопереноса, кг/(кг·ч·°В);  $\theta_{\text{пов}}$ ,  $\theta_{\text{в}}$  – потенциал влажности на поверхности материала и продувочного воздуха соответственно, °В.

Непосредственное использование зависимости (12) для расчета потока влаги в продуваемом слое возможно только при наличии математических или графических зависимостей для определения величин  $\theta$ .

Каждому значению потенциала влажности  $\theta$  соответствует бесконечное множество сочетаний значений температуры  $t$  и относительной влажности воздуха  $\varphi$ . Профессор В.Н.Богословский и доцент А.Н. Гвоздков, используя известные соотношения параметров влажного воздуха и шкалу потенциала влажности, экспериментально построили зависимости между потенциалом влажности и упругостью водяного пара в воздухе при различных температурах и нанесли линии постоянных потенциалов влажности на  $I-d$ -диаграмму. Использование данной  $I-d-\theta$ -диаграммы осложнено отсутствием ее математической обработки.

В главе дано термодинамическое обоснование построения линий постоянных потенциалов  $\theta = \text{const}$  на  $I-d$ -диаграмму. В результате графоаналитических исследований получены зависимости для определения значений потенциала влажности в различных диапазонах температур и относительных влажностей:

$$\text{при } t > 10 \text{ }^\circ\text{C} \text{ и } \varphi \geq 80 \% \quad \lg\theta = 0,12d - 0,049t + 1,056; \quad (13)$$

$$\text{при } t > 10 \text{ }^\circ\text{C} \text{ и } \varphi < 80 \% \quad \lg\theta = 0,096d + 0,082 \quad (20 < d \leq 30); \quad (14)$$

$$\lg\theta = 0,057d + 0,829 \quad (0 < d \leq 20). \quad (15)$$

В результате дополнительных исследований  $I-d-\theta$ -диаграммы в области низких положительных температур (ниже 10 °С) получены зависимости:

$$p_{\text{п}} = 0,023 + 0,017 \cdot \theta^{1,34}; \text{ при } p_{\text{п}} \leq 0,4 \text{ кПа и } \varphi < 65 \% ; \quad (16)$$

$$p_{\text{п}} = 4,15 \cdot \ln(0,46 \cdot \ln(\theta)); \text{ при } p_{\text{п}} > 0,4 \text{ кПа и } \varphi < 65 \% . \quad (17)$$

$$p_{\text{п}} = 0,66 + 0,067 \cdot t \cdot \left(1 - e^{(-0,088 + 0,0033 \cdot t)\theta}\right) \quad (\text{при } 0 \leq t \leq 5 \text{ и } 65 < \varphi \leq 100); \quad (18)$$

$$p_{\text{п}} = 0,46 + 0,11 \cdot t + (-0,81 - 0,04 \cdot t) \cdot (0,91 \cdot t^{0,027})^\theta \quad (\text{при } t > 5 \text{ и } 65 < \varphi \leq 100). \quad (19)$$

Используя зависимости (16)...(19) были нанесены линии постоянных значений потенциала влажности  $\theta = \text{const}$  на  $I-d$ -диаграмму в области низких положительных температур (рисунок 11).

С использованием зависимостей (13)...(15) построены изотермы сорбции-десорбции в координатах  $w_{\text{тр}} - \theta$ .



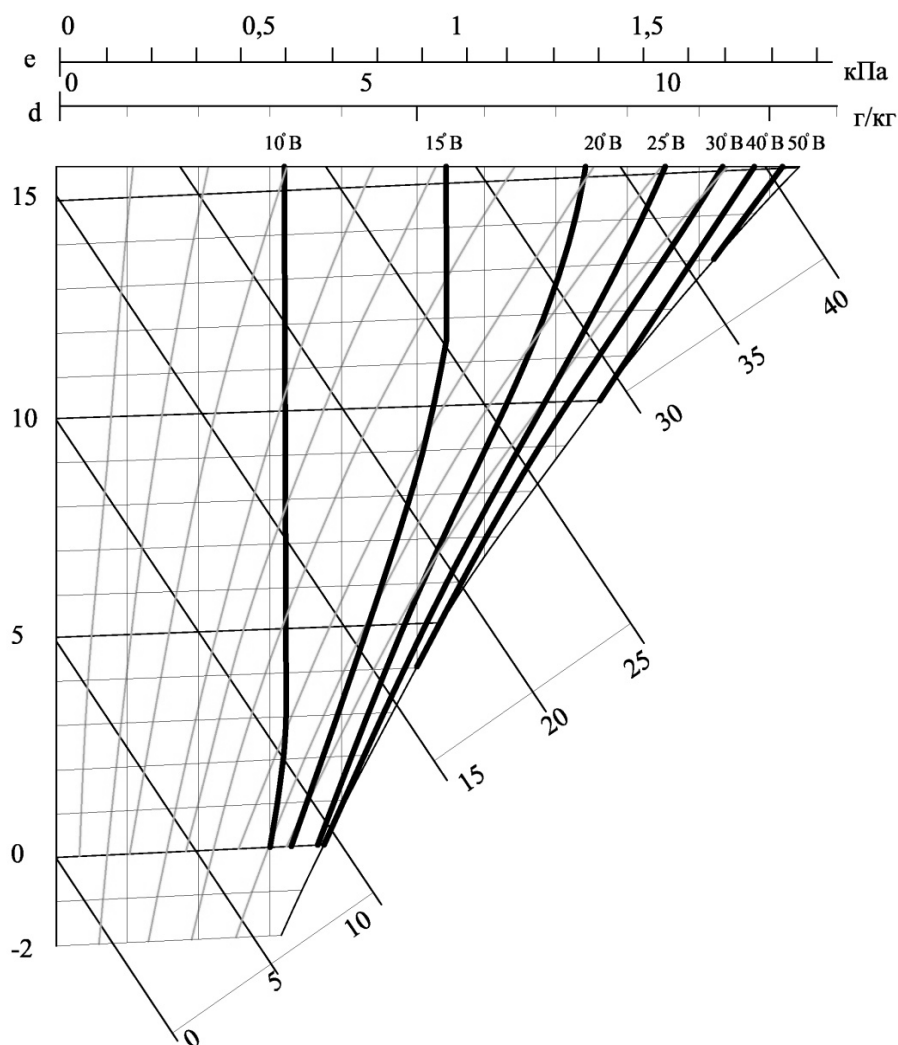


Рисунок 11 – Уточненная  $I-d-\theta$  диаграмма в области низких положительных температур

Полученные в результате графо-аналитических исследований математические зависимости (13)...(19) для определения значений потенциала влажности воздуха  $\theta$  позволяют упростить инженерные методики расчета процесса сушки и хранения биологически активного сырья.

Разработана теплофизическая модель процессов изменения состояния воздуха при продувке его через слой растительного сырья на основе  $I-d-\theta$ -диаграммы. Предложена система построений процессов теплообмена в слое биологически активной продукции, которая позволяет определить степень изменения влагопоглощающей способности воздуха при сушке и хранении растительного сырья. Сорбирующая способность воздуха и направление процессов теплообмена в слое могут быть однозначно определены через разность потенциалов влажности при любых параметрах наружного воздуха и способах его обработки.

В результате натурального эксперимента по выявлению темпа самосогревания травы получена зависимость теплоты биологических тепловыделений  $q$ , Вт/кг, от влажности материала  $w_{\text{мат}}$ , %. Для аналитического расчета значений

тепловыделений предложены зависимости:

$$\text{трава} \quad q = 383,2 \cdot w_{\text{тр}}^{4,408} \cdot \exp(-2,925 \cdot w_{\text{тр}}), \quad (20)$$

$$\text{зерно} \quad q = 5,7 \cdot 10^{14} \cdot w_3^{15,93} \cdot \exp(-38,4 \cdot w_3). \quad (21)$$

Влагодоток  $W$ , г, от высушиваемого материала массой  $G_{\text{мат}}$ , т, к сушильному агенту равен (луч 1–3, рисунок 12):

$$W = \alpha_{\theta} (\theta_{\text{к}} - \theta_{\text{н}}) G_{\text{мат}} \quad (22)$$

где  $\theta_{\text{н}}$ ,  $\theta_{\text{к}}$  – потенциалы влажности воздуха, соответственно, в начале и конце процесса сушки, °В.

Величина потенциала влажности  $\theta_{\text{н}}$  на входе в корректирующий слой определяется параметрами атмосферного воздуха. Потенциал  $\theta_{\text{к}}$  зависит от гигроскопических свойств материала, описанных изотермами сорбции-десорбции.

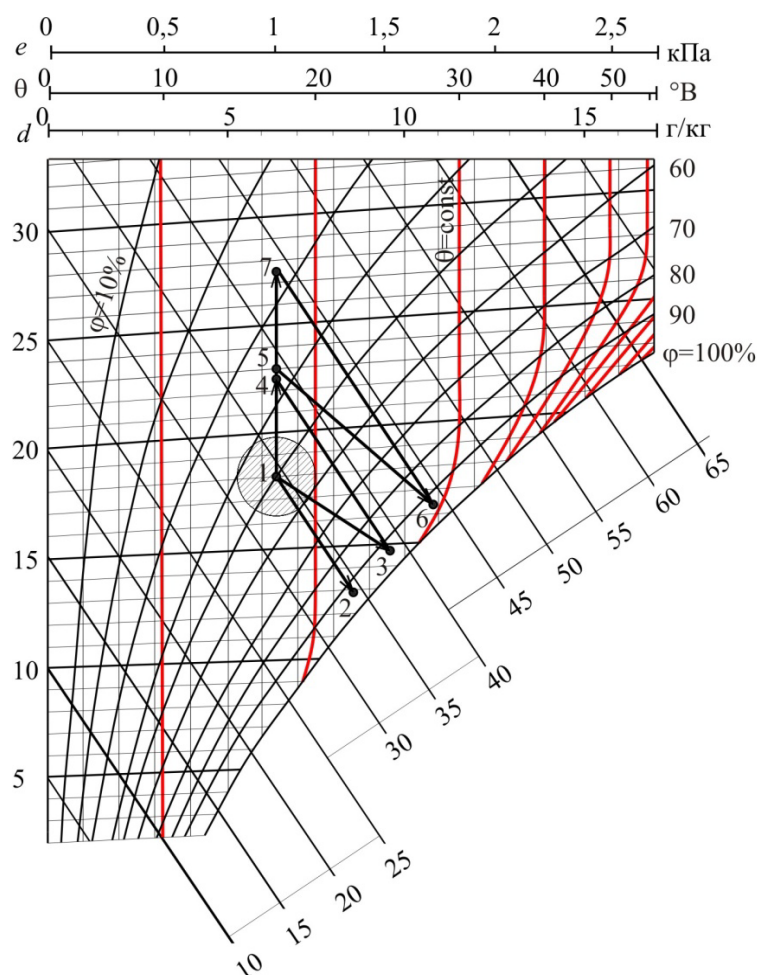


Рисунок 12 – Диаграмма к расчету интенсивности и времени сушки растительного сырья

Коэффициент  $\alpha_{\theta}$  по своему физическому смыслу является показателем интенсивности процесса влагопереноса. Графическая зависимость  $\alpha_{\theta} = f(t)$  для травы, построенная на основе экспериментальных данных, приведена на рисунке 13.

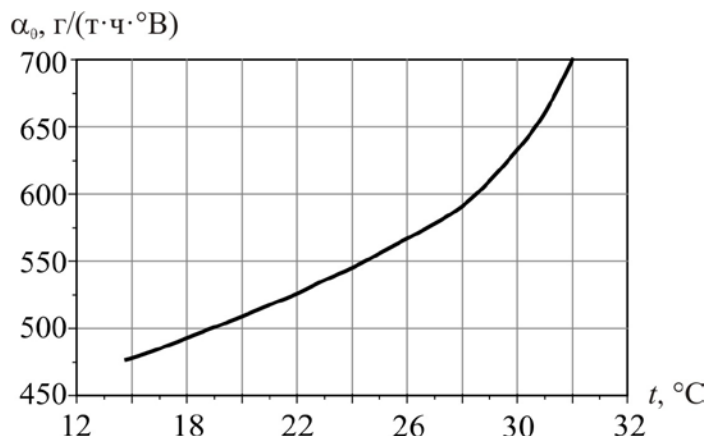


Рисунок 13 – Значения коэффициента  $\alpha_0$  в слое сохнувшей травы

Для аналитического определения коэффициента массопереноса  $\alpha_0$ , с достаточной для инженерных расчетов степенью точности, предложено использовать выражения:

$$\begin{aligned} \text{при } t < 20 \text{ }^\circ\text{C} & \quad \alpha_0 = 8,15t + 363, \\ \text{при } 20 \text{ }^\circ\text{C} < t < 25 \text{ }^\circ\text{C} & \quad \alpha_0 = 10,4t + 317 \\ \text{при } 25 \text{ }^\circ\text{C} < t < 30 \text{ }^\circ\text{C} & \quad \alpha_0 = 23,8t - 27 \end{aligned} \quad (23)$$

Предложенная методика позволяет аналитически определить значения коэффициента  $\alpha_0$  из условия:

$$\alpha_0 = \frac{g_b (d_k - d_n)}{\theta_k - \theta_n}. \quad (24)$$

где  $d_n$ ,  $d_k$  – влагосодержание воздуха, соответственно, в начале и конце процесса сушки, г/кг сух. в-ва;  $g_b$  – удельный расход воздуха, кг/(ч·т).

В результате натурных исследований температурно-влажностных полей в хранилище сочного растительного сырья получены расчетные поля потенциала влажности (рисунок 14) и выявлена динамика изменения значений потенциала влажности по высоте хранящейся продукции. В результате аппроксимации экспериментальных данных получена зависимость:

$$\theta = \frac{h + 12,19}{0,74}, \quad (25)$$

где  $h$  – высота слоя хранящейся продукции, м.

Используя уточненную  $I-d-\theta$ -диаграмму и полученные ранее экспериментальные данные, представленные в научной литературе, получена графическая зависимость коэффициента массопереноса  $\alpha_0$ , г/(г·ч·°В) от температурного перепада  $\Delta t$ , °C и удельного расхода воздуха  $g_b$ , кг/(ч·т) при хранении сочного растительного сырья (рисунок 15).

Для аналитического определения коэффициента массопереноса  $\alpha_\theta$  в процессе хранения предложено использовать следующие выражения:

$$\begin{aligned} \text{при } 10 < g_s < 20 & \quad \alpha_\theta = 0,25 \cdot \Delta t + 2,94; \\ \text{при } 20 < g_s < 30 & \quad \alpha_\theta = 0,42 \cdot \Delta t + 4,9; \\ \text{при } 30 < g_s < 40 & \quad \alpha_\theta = 0,59 \cdot \Delta t + 6,86, \end{aligned} \quad (26)$$

где  $\Delta t$  – температурный перепад уходящего и подаваемого воздуха, °С.

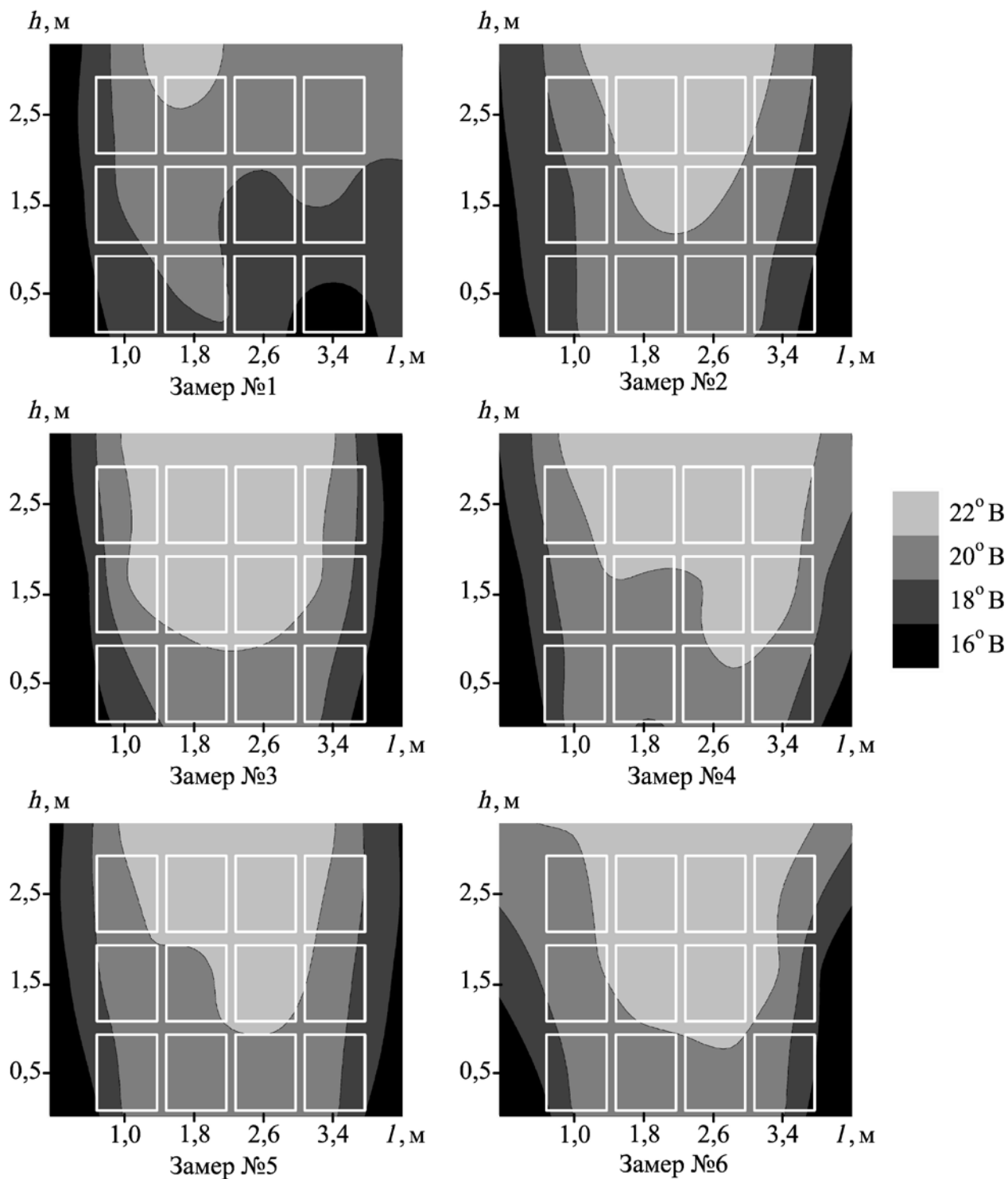
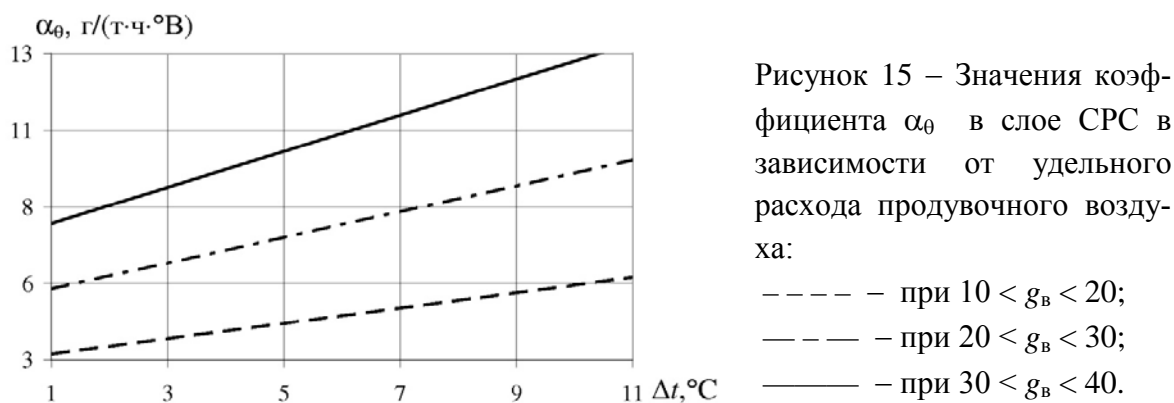


Рисунок 14 – Поля потенциала влажности в хранилище



Для достижения условий максимальной сохранности продукции время работы системы обеспечения параметров микроклимата в течение суток  $K_{\text{в.вл}}^\theta$  составляет:

$$K_{\text{в.вл}}^\theta = \frac{W}{\alpha_\theta (\theta_k - \theta_n) G_{\text{мат}}}, \quad (27)$$

где  $W$  – удельные влаговыделения продукцией, г/ч.

Таким образом, предложенная инженерная методика расчета режимов работы систем обеспечения микроклимата при хранении биологического сырья позволяет скорректировать время работы систем вентиляции, что приводит к повышению сохранности продукции и сокращению затрат на обеспечение оптимальных параметров хранения.

Для выявления теплофизических характеристик атмосферного воздуха, как агента сушки, проведена оценка обеспеченности параметров наружного климата для осуществления процесса сушки растительного сырья в условиях Самарской области, климат которой характерен для большинства регионов Поволжья. Значения  $K_{\text{об}}$  в период заготовки сена и зерна определены по результатам статистической обработки метеорологических данных. Минимальный полученный и рекомендованный для инженерных расчетов коэффициент обеспеченности требуемых параметров наружного воздуха как сушильного агента при сушке растительного сырья системами активной вентиляции на территории Среднего Поволжья составляет  $K_{\text{об}} = 0,9$  не менее 10 часов в сутки.

Проведен анализ обеспеченности естественным холодом процесса охлаждения СРС для климатических условий Среднего Поволжья. Оценка возможности использования необработанного атмосферного воздуха при хранении СРС проводилась на основе расчета температуры и потенциала влажности наружного воздуха в процессе вентилирования. Обеспеченность параметров наружного воздуха для условий хранения в данных климатических районах составляет  $K_{\text{об}} = 0,4 \dots 0,5$ .

**В пятой главе** приводится теоретическо-экспериментаное обоснование разработанной методики нормирования сопротивления влагопередаче наружных ограждений неотопливаемых производственных сельскохозяйственных зданий как единых биоэнергетических комплексов.

Анализ методов расчета влажностного режима наружных ограждений вследствие диффузии водяных паров и теории влагопроводности показал, что влажностный режим ограждений в нестационарных условиях влагопереноса возможно рассчитать только на основе полного термодинамического потенциала переноса теплоты и влаги - потенциала влажности. Разработан комплексный метод нормирования сопротивления теплопередаче  $R_0^{tp}$ ,  $m^2 \cdot ^\circ C / Wt$ , по нормируемому удельному тепловому потоку  $q_6^H$ ,  $Wt/m^2$ , и сопротивления влагопередаче  $R_0^{tp}$ ,  $m^2 \cdot ч \cdot ^\circ B / кг$ , в шкале потенциала влажности по нормируемому удельному потоку влаги  $i^H$ ,  $кг / (m^2 \cdot ч)$ , наружных ограждений. Метод включает: выбор и расчет движущих сил переноса теплоты и влаги в шкале потенциала влажности; аналитические зависимости расчета коэффициентов влагообмена на внутренних поверхностях ограждений.

Обеспечением требуемого сопротивления теплопередаче  $R_0^{tp}$  на стадии проектирования решается задача энергосбережения за счет утилизации явной физиобиологической теплоты. Обеспечением требуемого сопротивления влагопередаче  $R_0^{tp}$  поддерживаются стабильные количественные показатели теплотехнических характеристик наружных ограждений в процессе всего расчетного срока эксплуатации.

Нормируемое сопротивление теплопередаче наружных ограждений сельскохозяйственных зданий определяется по соотношениям:

$$R_0^{tp} = (t_b - t_n) / q_6^H; q_6^H = (1 - m) Q_6 / F, \quad (28)$$

где  $F$  – площадь надземных стен и покрытия,  $m^2$ ;  $m$  – коэффициент, учитывающий долю потерь теплоты через полы, подземные и обвалованные части наружных ограждений;  $t_b$  и  $t_n$  – температура внутреннего и наружного воздуха, соответственно,  $^\circ C$ .

В исследованиях В.Н. Богословского доказана возможность применения классических термодинамических представлений к явлениям переноса вещества. Поэтому по аналогии с основным законом теплопроводности удельный поток влаги  $i$ ,  $кг / (m^2 \cdot ч)$ , пропорционален градиенту потенциала влажности  $\nabla \theta$ ,  $^\circ B$ :

$$i = -\chi \nabla \theta, \quad (29)$$

где  $\chi$  – коэффициент влагопроводности материала,  $кг / (m \cdot ч \cdot ^\circ B)$ .

По аналогии процессов тепло- и влагопереноса получена зависимость для расчета приведенного сопротивления влагопередаче  $R_{0,0}$ ,  $m^2 \cdot ч \cdot ^\circ B / кг$ . Значения

сопротивлений влагообмену на поверхностях ограждений пренебрежимо малы, поэтому в инженерных расчетах ограждающих конструкций используем зависимость:

$$R_{\theta,0} = \sum_{i=1}^n \delta_i / \chi_i \quad (30)$$

Сопротивление влагопередаче  $R_{\theta,0}$ ,  $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{°В} / \text{кг}$ , показывает разность потенциалов влажности  $\Delta\theta$ ,  $\text{°В}$ , при которой через  $1 \text{ м}^2$  ограждения в течение  $1 \text{ ч}$  передается  $1 \text{ кг}$  влаги.

Аналитическая зависимость для определения коэффициента влагопроводности  $\chi$ ,  $\text{кг} / (\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{°В})$ , любого строительного материала толщиной  $\delta$ ,  $\text{м}$ , получена из равенства количества влаги  $i$ ,  $\text{кг} / (\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ , проходящей сквозь плоскую стенку, рассчитанной на основе двух теорий влагопереноса - теории диффузии водяного пара и теории потенциала влажности:

$$\begin{cases} i = (e_{\text{в}} - e_{\text{н}}) \mu / \delta; \\ i = (\theta_{\text{в}} - \theta_{\text{н}}) \chi / \delta. \end{cases} \quad (31)$$

где  $e_{\text{в}}$  и  $e_{\text{н}}$  - упругость водяного пара внутреннего и наружного воздуха,  $\text{с} \cdot \text{Па}$ ;  $\mu$  - коэффициент паропроницаемости материала,  $\text{г} / (\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$ ;  $\theta_{\text{в}}$ ,  $\theta_{\text{н}}$  - потенциал влажности внутреннего и наружного воздуха,  $\text{°В}$ ;

Из (31) имеем зависимость для расчета коэффициента влагопроводности конкретного материала конструкции  $\chi$ ,  $\text{кг} / (\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{°В})$ :

$$\chi = (e_{\text{в}} - e_{\text{н}}) \mu / (\theta_{\text{в}} - \theta_{\text{н}}) \quad (32)$$

На основании формулы (31) построена графическая зависимость между коэффициентом влагопроводности пенобетона  $\chi$  и разницей потенциалов влажности внутреннего и наружного воздуха  $\Delta\theta$ ,  $\text{°В}$  (рисунок 16). Значения коэффициентов влагопроводности лежат в пределах от  $1,5 \cdot 10^{-5}$  до  $2,1 \cdot 10^{-5}$   $\text{кг} / (\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{°В})$  и имеют высокую сходимость с данными, полученными В.Н. Богословским экспериментально.

Значения коэффициентов влагопроводности для некоторых строительных материалов, рассчитанные по зависимости (31) представлены в таблице 2.

Для многослойных конструкций наружных ограждений (например, трехслойных) имеем аналитические зависимости коэффициентов влагопроводности  $\chi$  в размерности потенциала влажности:

$$\chi_1 = (e_{\text{в}} - e_{\text{II}}) \mu_1 / (\theta_{\text{в}} - \theta_{\text{II}}); \quad (33)$$

$$\chi_2 = (e_{\text{II}} - e_{\text{III}}) \mu_2 / (\theta_{\text{II}} - \theta_{\text{III}}); \quad (34)$$

$$\chi_3 = (e_{\text{III}} - e_{\text{н}}) \mu_3 / (\theta_{\text{III}} - \theta_{\text{н}}), \quad (35)$$

где  $e_{II}$  и  $e_{III}$ ,  $\theta_{II}$  и  $\theta_{III}$  – соответственно, упругость водяного пара, Па, и величина потенциала влажности, °В, между первым и вторым и вторым и третьим слоями конструкции.

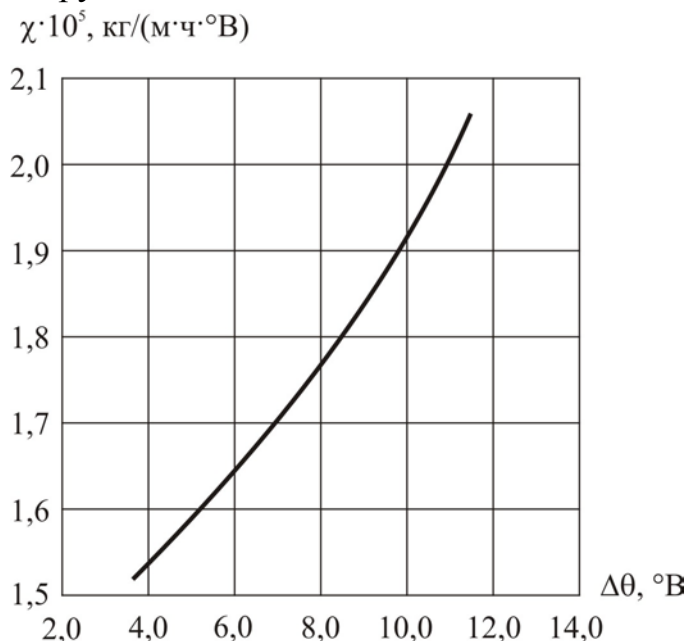


Рисунок 16 – Зависимость коэффициента влагопроводности пенобетона от разности потенциалов влажности внутреннего и наружного воздуха

Таблица 2 – Значения коэффициентов влагопроводности для некоторых строительных материалов

№ п/п	Наименование материала	Плотность $\rho_0$ , кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент паропроницаемости $\mu$ , мг/(м·ч·Па)	Коэффициент влагопроводности $\chi \times 10^5$ , кг/(м·ч·°В)
1	Кирпичная кладка из керамического пустотного кирпича плотностью 1400 кг/м <sup>3</sup> на цементно-песчаном растворе	1600	0,14	1,4
2	Железобетон	2500	0,03	0,3
3	Керамзитобетон на керамзитовом песке и керамзитопенобетон	1800	0,09	0,9
		1000	0,14	1,4
		800	0,19	1,8
4	Полистиролбетон (ячеистый бетон)	600	0,068	0,7
5	Листы асбестоцементные плоские	1800	0,03	0,3
6	Сосна и ель вдоль волокон	500	0,32	3,1
7	Плиты минераловатные	100	0,56	5,4

Предложен графо-аналитический метод определения значений потенциала влажности  $\theta$  в толще многослойных ограждающих конструкций, позволяющий выявить интенсивность влагопереноса в наружных ограждениях. Конструктивные слои приводятся к эквивалентной толщине основного слоя ( $\delta_{ут}^* = \delta_{ут} \mu_1 / \mu_2$ ,  $\delta_{шт}^* = \delta_{шт} \mu_1 / \mu_3$ ) по аналогии с методом конечных разностей температур при расчетах нестационарной теплопередачи через ограждение. Задача определения потенциала влажности в любом сечении толщи стены сводится к



построению графической зависимости  $\theta = f(\delta)$  для полученной условной одно-слойной конструкции.

Требуемое сопротивление влагопередаче  $R_{\theta}^{тр}$ ,  $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{°В} / \text{кг}$ , определяется по зависимости:

$$R_{\theta}^{тр} = \frac{(\theta_{в} - \theta_{н})}{i^{н}} = \frac{(\theta_{в} - \theta_{н})}{\Delta\theta^{н}\beta_{в}^{\theta}} \quad (36)$$

где  $\Delta\theta^{н}$  – перепад потенциала влажности внутреннего воздуха и внутренней поверхности ограждающей конструкции,  $\text{°В}$ .

За основу нормирования принят удельный поток влаги через ограждение  $i^{н}$ ,  $\text{кг} / (\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ , равный:

$$i^{н} = \Delta\theta^{н}\beta_{в}^{\theta} \quad (37)$$

Физический смысл принятого положения по нормированию удельного потока влаги заключается в рассеивании через наружные ограждения избытков влаги, выделяющейся в процессе жизнедеятельности животных, птиц, хранящейся продукции. Такая необходимость диктуется предотвращением в холодный период года увлажнения материалов наружных ограждений, влекущего снижение их теплозащитных характеристик, подобранных в результате теплотехнических расчетов. При отсутствии вентиляции влага  $G_{вл}^{\circ}$ ,  $\text{кг} / \text{ч}$ , выделяемая в помещении, может удаляться только через наружные ограждения площадью  $F$ ,  $\text{м}^2$ . Поэтому расчетный (нормируемый) удельный поток влаги через них  $i^{н}$ ,  $\text{кг} / (\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ , составляет:

$$i^{н} = G_{вл}^{\circ} / F \quad (38)$$

Коэффициент влагообмена  $\beta_{в}^{\theta}$ ,  $\text{кг} / (\text{ч} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{°В})$ , равен:

$$\beta_{в}^{\theta} = \frac{G_{вл}^{\circ}}{F\Delta\theta^{н}} \quad (39)$$

Зависимость (39) однозначно характеризует требуемую интенсивность влагообмена на внутренних поверхностях наружных ограждений. Она увязывает температурно-влажностные параметры среды и наружных ограждений ( $\Delta\theta^{н}$ ): с объемно-планировочными и конструктивными решениями зданий ( $F$ ); с технологией производства, видом животных, птиц, хранящегося сырья, режимами эксплуатации ( $G_{вл}^{\circ}$ ).

На основе экспериментальных данных были получены значения перепадов потенциалов влажности  $\Delta\theta_{\theta}$ ,  $\text{°В}$ , между внутренним воздухом и внутренними поверхностями наружных ограждений, по результатам которых построены зависимости  $\Delta\theta^{нС} = f(t_{в})$  для наружных стен и  $\Delta\theta^{нП} = f(t_{в})$  для бесчердачного покрытия здания коровника (рисунок 17, 18). В качестве аппроксимирующих функций выбраны логарифмические:

- для наружных стен:  $\Delta\theta^{\text{HC}} = 1,23\ln(t_{\text{в}}) - 1,16;$   
 – для бесчердачного покрытия:  $\Delta\theta^{\text{БП}} = 4,74\ln(t_{\text{в}}) - 8,98.$  (40)

Наличие отрицательных значений перепадов потенциалов влажности свидетельствует о направлении движения влаги внутрь помещения.

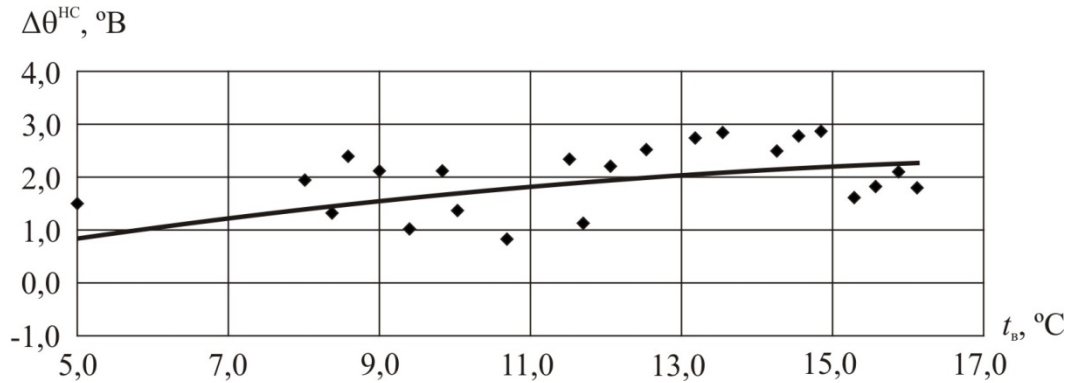


Рисунок 17 – Зависимость перепада потенциалов влажности внутреннего воздуха и внутренней поверхности наружной стены здания коровника от температуры внутреннего воздуха

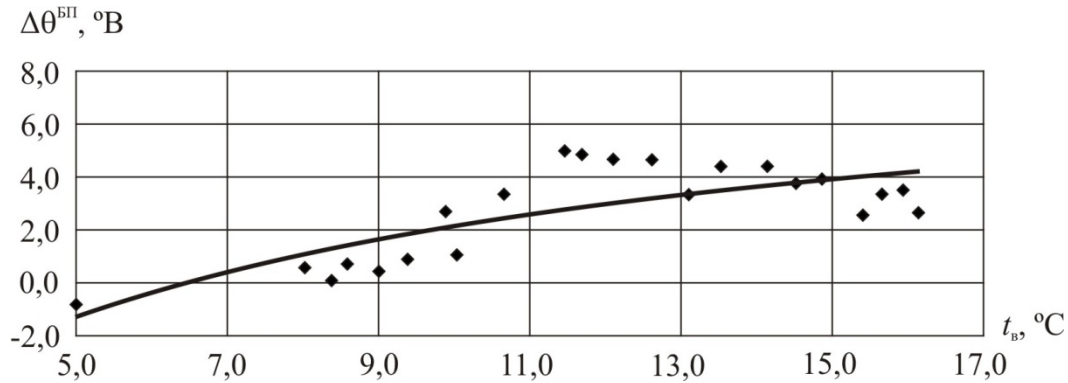


Рисунок 18 – Зависимость перепада потенциалов влажности внутреннего воздуха и внутренней поверхности бесчердачного покрытия здания коровника от температуры внутреннего воздуха

Расчетного значения потенциала влажности наружного воздуха  $\theta_{\text{н}}$  при заданном коэффициенте обеспеченности  $K_{\text{об}}$  приведено в виде статистического ряда на рисунке 19.

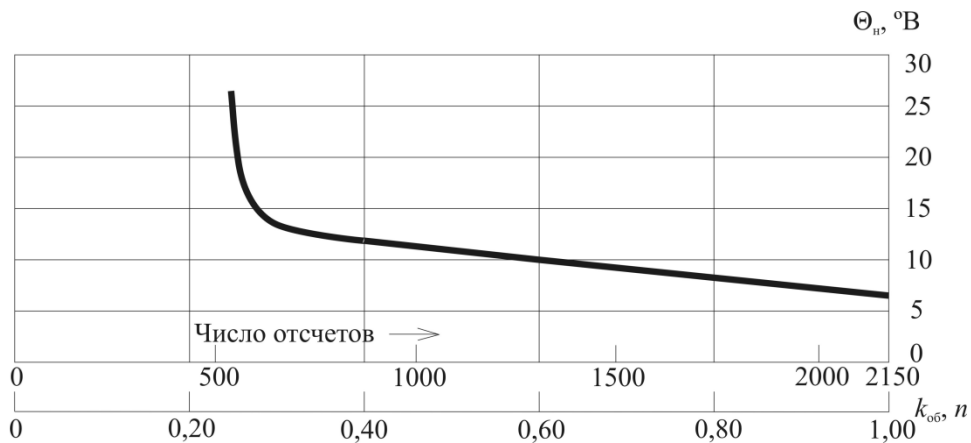


Рисунок 19 – Статистический ряд среднесуточных значений потенциала влажности

За расчетный параметр внутреннего воздуха принимается значение потенциала влажности  $\theta_v$ , °В. Он является функцией температуры и относительной влажности воздуха, значение которых для помещений сельскохозяйственных зданий регламентируются нормами технологического проектирования. В таблице 3 приведены нормируемые значения потенциалов влажности внутреннего воздуха для сельскохозяйственных помещений различного функционального назначения.

Таблица 3 – Нормируемые параметры внутреннего воздуха для сельскохозяйственных помещений

№ п/п	Наименование помещений	Расчетная температура $t_v$ , °С	Относительная влажность воздуха $\varphi_v$ , %	Потенциал влажности $\theta_v$ , °В
1	Коровники, помещения для молодняка старше года, скота на откорме, быков	10	60	12,3
2	Телятники	12	60	13,3
3	Родильное отделение	15	60	15,3
4	Помещения для скота мясных пород	3	65	10,3
5	Помещения для хряков	16	60	16,1
6	Помещения для маток подсосных с поросятами	20	55	18,8
7	Помещения для свиней на откорме	18	55	16,6
8	Помещения для взрослых кур (напольное содержание)	17	65	18,4
9	Помещения для цыплят-бройлеров, крупных мясных цыплят в возрасте 1 недели (напольное содержание)	27	70	50,3
10	Помещения для взрослых уток (напольное содержание)	14	75	17,6
11	Помещения для молодняка уток в возрасте 2...4 недель (напольное содержание)	20	70	24,8
12	Помещения для хранения картофеля	4	90	12,5
13	Помещения для хранения капусты, моркови	1	90	11,3
14	Помещения для хранения лука, чеснока	0	80	10,4

Нормирование теплофизических характеристик наружных ограждений неотапливаемых производственных сельскохозяйственных зданий по теплотехническим требованиям ( $R_0^{TP}$ ) и по требованиям сопротивления влагопередаче ( $R_0^{TP}$ ) является единым теплофизическим взаимосвязанным процессом. Приоритетным является расчет сопротивления теплопередаче наружных ограждений. На основе теплотехнического расчета обосновываются близкие к оптимальным объемно-планировочные решения помещений зданий, осуществляется выбор конструкций их наружных ограждений. Изменение конструкций наружных ограждений по требованиям  $R_0^{TP}$  не должно приводить к снижению теплотехниче-

ских характеристик ограждений, к изменению тепловых балансов помещений в сторону увеличения дефицита теплоты.

Порядок расчета влажностного режима наружных ограждений:

1. Определяются значения потенциалов влажности внутреннего  $\theta_v$  и наружного  $\theta_n$  воздуха, °В.

2. Определяются перепады потенциалов влажности внутреннего воздуха и внутренней поверхности наружной стены  $\Delta\theta^{НС}$  и бесчердачного покрытия  $\Delta\theta^{БП}$ , °В.

3. Рассчитывается коэффициент влагообмена  $\beta_v^\theta$ , кг/(ч·м<sup>2</sup>·°В).

4. Вычисляется величина требуемого сопротивления влагопередаче  $R_{\theta}^{ТР}$ , м<sup>2</sup>·ч·°В/кг.

5. Определяются значения коэффициентов влагопроводности  $\chi$ , кг/(м·ч·°В), для однослойного ограждения по (32), для многослойного по (33...35). Значения потенциалов влажности на границах материальных слоев определяются графоаналитическим методом.

6. Рассчитываются приведенные сопротивления влагопередаче ограждающих конструкций здания  $R_{\theta,0}$ , м<sup>2</sup>·ч·°В/кг.

По результатам расчета проверяется выполнение требования по влажностному режиму наружных ограждений:  $R_{\theta,0} \leq R_{\theta}^{ТР}$ . В случае, если ограждающие конструкции не удовлетворяют данному условию, в период с температурой наружного воздуха ниже  $t_n^p$  в помещении сельскохозяйственного здания будет накапливаться выделяемая животными, птицами, хранящейся продукцией влага. Следовательно, необходимо изменить конструкцию наружных стен и покрытия, применив строительные материалы с большим коэффициентом влагопроводности либо рассмотреть вариант использования систем вентиляции или осушения внутреннего воздуха.

**В шестой главе** приведены результаты внедрения разработанных методик расчета в практику проектирования, реконструкции и эксплуатации систем обеспечения микроклимата в зданиях и сооружениях сельскохозяйственного и жилищно-коммунального комплексов.

Расчетный экономический эффект от внедрения естественно-механической вентиляции в многоэтажных жилых домах в Самарской и Нижегородской областях за счет снижения затрат теплоты на нагрев инфильтрующегося воздуха при одновременном поддержании требуемых санитарно-гигиенических норм в квартирах составил 39,37 млн. руб./год в ценах 2016 г.

Апробация предложенных инженерных методик расчета в реальных условиях проводилась в агропромышленных комплексах Ставропольского района

Самарской области. Оптимизации режимов работы систем обеспечения параметров микроклимата позволила снизить убыль продукции при сушке и хранении, повысить питательную ценность заготавливаемых кормов и достигнуть экономического эффекта более 5,6 млн. руб./год в ценах 2016 г.

Разработанная методика расчета требуемых влажностных характеристик наружных ограждений производственных сельскохозяйственных зданий пригодна как при новом строительстве, так и при реконструкции сооружений. Предложены варианты реконструкции теплового контура производственных сельскохозяйственных зданий, расположенных на территории Ставропольского района Самарской области, экономический эффект от внедрения которых составляет до 680 тыс. руб. /год в ценах 2016 г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Системный анализ современного состояния повышения энергоэффективности гражданских и производственных сельскохозяйственных зданий и сооружений выявил отсутствие единого методологического подхода по снижению потребления энергии пассивных (тепловой контур) и активных (системы отопления, вентиляции, кондиционирования, холодоснабжения) элементов систем обеспечения параметров микроклимата в круглогодичном цикле эксплуатации, в том числе за счет преобладающего использования естественных источников энергии. Для практических инженерных расчетов динамики переноса теплоты и влаги на основе полного термодинамического потенциала фаз необходимы дополнительные теоретические и графоаналитические исследования по определению количественных показателей градиентов движения теплоты и влаги.

2. Разработана физико-математическая модель систем естественной вентиляции энергоэффективных многоквартирных жилых домов, представляющая систему нелинейных алгебраических уравнений, решаемых итерационными численными методами и пошаговое вычисление по разработанной программе. Уточненная методика аэродинамического расчета систем естественной вентиляции для зданий с теплыми чердаками основана на разделении общей системы на две самостоятельные: «жилые помещения – теплый чердак»; «теплый чердак – атмосферный воздух».

3. Установлено, что применение комбинированных (естественно-механических) систем вентиляции при новом строительстве или реконструкции многоквартирных жилых домов массовой застройки позволяет стабилизировать работу систем обеспечения параметров микроклимата в круглогодичном цикле эксплуатации, исключает дополнительные затраты теплоты на нагрев инфильтрующегося воздуха.

4. Теоретически и экспериментально в лабораторных и натуральных условиях определены аэродинамические характеристики подземных пешеходных переходов с целью создания в тоннелях необходимых воздухообменов при использовании только естественных (ветрового давления) источников энергии. Установлено, что естественная вентиляция (аэрация) не обеспечивает устойчивую круглогодичную подачу минимального количества наружного воздуха. Подземные пешеходные переходы при наличии в них постоянных рабочих мест необходимо проектировать по допустимым температурно-влажностным и воздушным режимам как самостоятельный класс сооружений.

5. Доказано, что параметры, определяющие динамику влагообмена в системе «поверхность сочного растительного сырья – влажный воздух» как в процессах сушки (максимальный влагообмен), так и в процессах хранения картофеля и овощей (минимальный влагосъем), могут быть рассчитаны на основе теории полного термодинамического потенциала фаз (потенциала влажности).

6. С применением фундаментальных положений термодинамики обосновано нанесение линий постоянных потенциалов влажности на  $I-d$ -диаграмму влажного воздуха, в том числе в области низких температур. Получены аналитические зависимости для определения значений потенциалов влажности в различных диапазонах климатических показателей воздуха.

7. Разработаны графоаналитические зависимости изотерм сорбции – десорбции для биологического сырья в координатах потенциала влажности ( $w_{тр} - \theta$ ), необходимые для расчета интенсивности влагообмена и режимов работы систем активной вентиляции.

8. Аналитически и экспериментально в натуральных условиях показана достаточность естественных источников холода при хранении и теплоты при сушке биологически активного сырья. Инженерная методика расчета интенсивности тепломассообмена при сушке (трава, зерно) и хранении (картофель, овощи) биологически активной продукции позволяет оптимизировать конструктивные особенности систем активной вентиляции и снизить их энергоемкость.

9. Обоснован метод нормирования сопротивления влагопередаче в шкале потенциала влажности по нормируемому удельному потоку влаги наружных ограждений производственных сельскохозяйственных зданий при естественных источниках энергии. Разработанный метод включает выбор и расчет движущих сил переноса влаги; объективное задание расчетных параметров внутреннего и наружного воздуха в шкале потенциала влажности; обоснование ограничений при расчете влажностного режима наружных ограждений: по использованию естественной энергии, по интенсивности естественной вентиляции, по влажностному режиму многослойных ограждений; аналитические зависимости расчета коэффициентов влагообмена на внутренних поверхностях наружных огражде-

ний; экспериментальное определение и графоаналитическое представление разностей потенциалов влажности внутреннего воздуха и внутренних поверхностей наружных ограждений.

10. Результаты теоретических и экспериментальных исследований апробированы при проектировании, реконструкции и эксплуатации активных и пассивных элементов систем обеспечения микроклимата в сельскохозяйственных комплексах, а также проектными организациями при реализации региональных программ капитального ремонта жилого фонда Самарской и Нижегородской областей. Суммарный экономический эффект от внедрения научных разработок составил 45,66 млн. руб/год в ценах 2016 года.

Результаты работы могут быть рекомендованы для использования проектными, строительно-монтажными и специализированными организациями, занимающимися вопросами обеспечения параметров микроклимата в зданиях и сооружениях различного назначения.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### публикации в изданиях, индексируемых в Scopus

1. **Kucherenko, M.N.** Improving of agricultural products preservation by optimization of ventilation systems operation modes / M.N. Kucherenko, O.A. Sizenko, M.V. Bikunova // International Journal of Applied Engineering Research. – 2017. – Vol.12.– №9. – P.1914-1919.

2. **Kucherenko, M.N.** Increase of Agricultural products storage efficiency by optimization of ventilation systems operation modes / M.N. Kucherenko, O.A. Sizenko, M.V. Bikunova, O.V. Tarakanov, S.V. Maksimova // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2017. – Vol.12. – №17. – P.5040-5045.

3. **Kucherenko, M.N.** Application of moisture potential theory in design of fencing structures of agricultural buildings / M.N. Kucherenko, E.V. Chirkova, M.V. Bikunova, S.M. Salmin, S.V. Maksimova // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2018. – Vol.13. – №6. – P.2329-2334.

### публикации в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ

4. **Кучеренко, М.Н.** Анализ параметров атмосферного воздуха как агента сушки / М.Н. Кучеренко // Известия вузов. Строительство. – 2005. – № 3. – С.118-119.

5. **Кучеренко, М.Н.** Термодинамическая трактовка графоаналитического решения задачи влагопереноса / В.И. Бодров, Л.М. Дыскин, М.Н. Кучеренко // Известия вузов. Строительство. – 2005. – №9. – С.47-51.

6. **Кучеренко, М.Н.** Анализ эффективности систем естественной вентиляции жилых зданий с теплым чердаком / М.Н. Кучеренко, О.А. Сизенко // Приволжский научный журнал. – 2008. – № 3(7). – С. 33-37.

7. **Кучеренко, М.Н.** Исследование влияния температуры воздуха в чердачном помещении на работу систем естественной вентиляции в жилых зданиях с теплым чердаком / О.А. Сизенко, М.Н. Кучеренко // Научный Вестник ВГАСУ. Серия: Строительство и архитектура. – 2009. – № 4(16). – С. 33-39.

8. **Кучеренко, М.Н.** Термодинамическое обоснование определения коэффициента влагопроводности строительных материалов / М.Н. Кучеренко, Е.В. Чиркова // Приволжский научный журнал. – 2010. – № 4. – С. 129-135.

9. **Кучеренко, М.Н.** Графо-аналитические исследования  $I-d-\theta$ - диаграммы в области низких температур / Е.П. Кузнецов, М.Н. Кучеренко // Приволжский научный журнал. – 2012. – №2. – С.73-77.

10. **Кучеренко, М.Н.** Регулирование интенсивности потоков влаги в наружных ограждениях / В.И. Бодров, М.Н. Кучеренко // Приволжский научный журнал. – 2012. – № 4. – С. 85-89.

11. **Кучеренко, М.Н.** Экспериментальное исследование тепловлажностных характеристик внутренних поверхностей ограждающих конструкций сельскохозяйственных зданий / М.Н. Кучеренко, Е.В. Чиркова // Вестник ВСГУТУ. – 2013. – № 2. – С. 45-50.

12. **Кучеренко, М.Н.** Применение теории потенциала влажности для расчета переноса влаги через наружные ограждения / М.Н. Кучеренко, Е.В. Чиркова // Известия вузов. Строительство. – 2013 – № 5. – С. 63-67.

13. **Кучеренко, М.Н.** Расчет времени работы систем активной вентиляции хранилищ сочного растительного сырья на основе градиента потенциала влажности / М.Н. Кучеренко, Е.П. Кузнецов // Вестник ВСГУТУ. – 2013. – №2. – С.81-85.

14. **Кучеренко, М.Н.** Методы снижения энергоемкости систем обеспечения микроклимата реконструируемых хранилищ сочного растительного сырья / В.И. Бодров, М.Н. Кучеренко, М.Н. Лазарев // Приволжский научный журнал. – 2013. – № 3. – С. 46-50.

15. **Кучеренко, М.Н.** Теплофизические характеристики теплового контура производственных сельскохозяйственных зданий / В.И. Бодров, М.Н. Кучеренко, Е.В. Чиркова // Приволжский научный журнал. – 2014. – № 3. – С. 59-65.

16. **Кучеренко, М.Н.** Интенсивность естественного воздухообмена в подземных пешеходных переходах / В.И. Бодров, М.Н. Кучеренко, В.В. Сухов // Известия вузов. Строительство. – 2014 – № 5. – С. 41- 48.



17. **Кучеренко, М.Н.** Экспериментальные исследования параметров микроклимата при контейнерном хранении сочного растительного сырья / Е.П. Кузнецов, М.Н. Кучеренко // Вестник ТГАСУ. – 2014. – №2. – С.142-149.

18. **Кучеренко, М.Н.** Определение фактической производительности систем естественной вентиляции с вертикальным сборным коллектором многоквартирных жилых домов/ М.В. Бодров, В.П. Болдин, В.Ю. Кузин, М.Н. Кучеренко// Приволжский научный журнал. – 2015. – № 1. – С. 54-59.

19. **Кучеренко, М.Н.** Аналитический расчет текущих параметров микроклимата подземных сооружений / В.И. Бодров, М.Н. Кучеренко, Г.В. Федорова // Приволжский научный журнал. – 2016. – № 2. – С. 51-56.

20. **Кучеренко, М.Н.** Проектирование системы вентиляции для сельскохозяйственных хранилищ с учётом динамики тепломассопереноса в слое сырья/ М.Н. Кучеренко, Е.П. Кузнецов, Г.И. Грейсх, С.А. Степанов, Е.Г. Ежов // Региональная архитектура и строительство. – 2016. – №3(28). – С. 149-154.

21. **Кучеренко, М.Н.** Разработка режимной карты работы систем вентиляции в многоквартирных жилых домах / М.Н. Кучеренко, О.А. Сизенко, О.В. Лелонд, М.В. Бикунова, Е.Г. Ежов // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – №3. – С.160-164.

22. **Кучеренко, М.Н.** Определение расчетных параметров наружного и внутреннего воздуха на основе теории потенциала влажности / М.Н. Кучеренко, Е.В. Чиркова, М.В. Бикунова, Г.И. Грейсх, В.В. Салмин // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – №1. – С. 162-167.

### **Монографии**

23. **Кучеренко, М.Н.** Микроклимат производственных сельскохозяйственных зданий и сооружений: научное издание/ В.И. Бодров, М.В. Бодров, Е.Г. Ионычев, М.Н. Кучеренко; под. общ. ред. В.И. Бодрова/ Н.Новгород: ННГАСУ. – 2008. – 623 с.

24. **Кучеренко, М.Н.** Энергоэффективные системы обеспечения микроклимата производственных сельскохозяйственных зданий и сооружений: монография/ М.Н. Кучеренко. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2016. – 124 с.

### **Учебное пособие**

25. **Кучеренко, М.Н.** Системы активной вентиляции для сушки биологически активного сырья: учебное пособие/ В.И. Бодров, М.В. Бодров, М.Н. Кучеренко, А.А. Юдинцев; под общ. ред. В.И. Бодрова / Н.Новгород: ННГАСУ, 2010. – 148 с.

### **Публикации в других изданиях**

26. **Кучеренко, М.Н.** Прогрессивные способы сушки растительного сырья с использованием солнечной энергии / М.Н. Кучеренко // Сб. тр.

аспирантов и магистрантов. Техн. науки. – Н. Новгород: ННГАСУ. – 2003. – С. 79-80.

27. **Кучеренко, М.Н.** Оценка обеспеченности параметров наружного воздуха для сушки растительного сырья на территории Самарской области / М.Н. Кучеренко // Сб. тр. аспирантов и магистрантов. Техн. науки. – Н. Новгород: ННГАСУ. – 2004. – С.135-137.

28. **Кучеренко, М.Н.** Использование потенциала влажности для расчета влагообмена в процессах сушки биологически активного сырья / В.И. Бодров, А.Н. Гвоздков, М.Н. Кучеренко // Качество внутреннего воздуха и окружающей среды : материалы III Междунар. науч. конф., сент. 2004 г. – Волгоград, 2004. – С. 112-116.

29. **Кучеренко, М.Н.** Начальная температура вентилирования при оценке возможности сушки растительного сырья / М.Н. Кучеренко // Экология и жизнь : сб. материалов VIII междунар. науч.-техн. конф. – Пенза, 2005. – С.103-105.

30. **Кучеренко, М.Н.** Аналитические зависимости по определению значений потенциала влажности / М.Н. Кучеренко // Сб. тр. аспирантов и магистрантов. Техн. Науки. – Н. Новгород: ННГАСУ. – 2005. – С.109-112.

31. **Кучеренко, М.Н.** Термодинамическое обоснование потенциала влажности / В.И. Бодров, Л.М. Дыскин М.Н. Кучеренко // Инженерные системы. АВОК – Северо-Запад.– №1. – 2006. – С.40-44.

32. **Кучеренко, М.Н.** Автоматизированная программа расчета систем естественной вентиляции жилых зданий с теплыми чердаками / В.И. Бодров, М.Н. Кучеренко, О.А. Сизенко // «Промышленная безопасность-2009» : сборник статей. Исследование технического состояния строительных конструкций зданий и сооружений в процессе экспертизы промышленной безопасности опасных производственных объектов. – Н.Новгород: ННГАСУ, 2008. – С. 17–18.

33. **Кучеренко, М.Н.** Проблемы теплотехнического расчета наружных ограждений сельскохозяйственных зданий / М.Н. Кучеренко, Е.В. Чиркова // Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов : Сб. тр. Международ. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов, аспирантов 10-12 ноября 2009 г. – Тольятти, ТГУ, 2009. – С. 281-284.

34. **Кучеренко, М.Н.** Решение вопроса энергосбережения в сельскохозяйственных зданиях с позиции теории потенциала влажности / М.Н. Кучеренко, Е.В. Чиркова // Энерго- и ресурсосбережение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии : Сб. материалов Всеросс. науч.-практич. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых 14-18 декабря 2009 г. – Екатеринбург, УГТУ-УПИ, 2009. – С. 320-323.

35. **Кучеренко, М.Н.** Определение потенциала влажности наружного воздуха для тепловлажностного расчета ограждающих конструкций сельскохозяйственных зданий / М.Н. Кучеренко, Е.В. Чиркова // Промышленная безопасность: Сб. науч.-производств. статей. Исследование технического состояния строительных конструкций зданий и сооружений в процессе экспертизы промышленной безопасности опасных производственных объектов – Н. Новгород, ННГАСУ, 2010. – С. 225-229.

36. **Кучеренко, М.Н.** Учет влажностного режима помещений при проектировании наружных ограждающих конструкций сельскохозяйственных зданий на основе теории потенциала влажности / М.Н. Кучеренко, Е.В. Чиркова // Строительная индустрия: вчера, сегодня, завтра: Сб. статей Международ. науч.-практич. конф. – Пенза, ПГСХА, 2010. – С. 53-56.

37. **Кучеренко, М.Н.** Снижение энергоемкости сельскохозяйственных зданий путем повышения надежности и эффективности ограждающих конструкций / М.Н. Кучеренко, Е.В. Чиркова // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии : Сб. материалов Всеросс. науч.-практич. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых 22-26 ноября 2010 г. – Екатеринбург, УрФУ, 2010. – С. 204-206.

38. **Кучеренко, М.Н.** Интенсивность процесса влагопереноса как показатель энергоэффективности хранения сочного растительного сырья / Е.П. Кузнецов, М.Н. Кучеренко // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии : Сб. материалов Всеросс. науч.-практич. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых 22-26 ноября 2010 г. – Екатеринбург, УрФУ, 2010. – С.110-112.

39. **Кучеренко, М.Н.** Учет влажностного режима наружных ограждающих конструкций сельскохозяйственных зданий как способ повышения их энергоэффективности / М.Н. Кучеренко, Е.В. Чиркова // Энерго- и ресурсосберегающие технологии в системах теплогасоснабжения и вентиляции : Сб. тр. XIII Международ. науч.-техн. конф. – Пенза: ПГУАС, 2011. – С. 259-262.

40. **Кучеренко, М.Н.** Пути повышения энергоэффективности систем обеспечения параметров микроклимата / М.Н. Кучеренко // Энерго- и ресурсосберегающие технологии в системах теплогасоснабжения и вентиляции : Сб. тр. XIII Международ. науч.-техн. конф. – Пенза: ПГУАС, 2011. – С. 207-210.

41. **Кучеренко, М.Н.** Применение  $I-d-\theta$ - диаграммы и понятия потенциал влажности в расчетах систем вентиляции хранилищ сочного растительного сырья / Е.П. Кузнецов, М.Н. Кучеренко // Научная индустрия европейского континента-2011: Материалы VII международ. науч.- практ. Конференции. – Publishing House «Education and Science» s.r.o, Чехия, 2011. – С.94-96.

42. **Кучеренко, М.Н.** Энергоэффективность комбинированной системы вентиляции в жилых зданиях / М.Н. Кучеренко, О.А. Сизенко // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии : Сб. материалов Всеросс. науч.-практич. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, 13-16 декабря 2011 г. – Екатеринбург, УрФУ, 2011. – С.143-144.

43. **Кучеренко, М.Н.** Исследование полей температур, относительной влажности и потенциала влажности в хранилище сочного растительного сырья / Е.П. Кузнецов, М.Н. Кучеренко // Ключевые аспекты научной деятельности – 2012: Материалы VIII междунар. науч.-практ. конференции. – Sp. z o.o. “Nauka I studia”, Przemysl, Польша, 2012. – С.87-90.

44. **Кучеренко, М.Н.** Время работы систем активной вентиляции как показатель энергоэффективности хранения сочного растительного сырья / Е.П.Кузнецов, М.Н. Кучеренко // Строительство-2012: Материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Ростов на Дону, Рост. гос.строит. ун-т, 2012. – С.158-160.

45. **Кучеренко, М.Н.** Применение потенциала влажности в расчете времени работы систем активной вентиляции как показатель энергоэффективности хранения сочного растительного сырья / Е.П. Кузнецов, М.Н. Кучеренко // Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов: Материалы II научно технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов. – Тольятти, 2012. – С.217-218.

46. **Кучеренко, М.Н.** Совершенствование систем естественной вентиляции жилых зданий / В.И. Бодров, М.Н. Кучеренко // Актуальные проблемы строительства, экологии и энергосбережения в условиях Западной Сибири: сб. материалов Всероссийской научно-практической конференции. – Тюмень: РИО ФГБОУ ВПО, 2012 – С.13-16.

47. **Кучеренко, М.Н.** Нормирование теплового контура сельскохозяйственных зданий / В.И. Бодров, М.В. Бодров, М.Н. Кучеренко, М.Н. Лазарев // Сантехника. Отопление. Кондиционирование. – 2013. – №10. – С.44-47.

48. **Кучеренко, М.Н.** Закономерности аэрации подземных пешеходных переходов/ В.И. Бодров, М.Н. Кучеренко, В.В. Сухов // Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции: Сб. докладов V Международной научно-технической конференции. – М.: МГСУ. – 2013. – С.146 - 151.

49. **Кучеренко, М.Н.** Причины и способы устранения неравномерности воздухообменов по этажам в жилых многоэтажных зданиях/ М.Н. Кучеренко // Проблемы энергосбережения в промышленном и жилищно-коммунальном комплексах: Сб. трудов XIV Международной научно-практической конференции. – Пенза. – 2013. – С. 121-123.

50. **Кучеренко, М.Н.** Эффективность работы систем вентиляции жилых зданий при круглогодичной эксплуатации/ В.И. Бодров, М.Н. Кучеренко / Качество внутреннего воздуха и окружающей среды: Материалы XI Международной научной конференции, г.Ханой. – Волгоград: ВолгГАСУ. – 2013. – С.253-258.

51. **Кучеренко, М.Н.** Повышение энергоэффективности хранения сочного растительного сырья с применением естественного холода / Е.П. Кузнецов, М.Н. Кучеренко // Перспективные научные исследования – 2014: Материалы X международной научно-практической конференции. – «Бял ГРАД-БГ» ООД, Болгария, 2014. – С.66-70.

52. **Кучеренко, М.Н.** Режимная карта работы систем вентиляции как основа энергосбережение // Концепции устойчивого развития науки в современных условиях: Материалы Международной научно-практической конференции, г. Казань. – Стерлитамак: АМИ. – 2017. – С.111-113.

Подписано в печать . Формат 60×84/16.  
Печать оперативная. Усл. п. л. 2,5.  
Тираж 100 экз. Заказ №

Издательство Тольяттинского государственного университета  
445020, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14