Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

На правах рукописи

КУЧЕРЕНКО Мария Николаевна

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МИКРОКЛИМАТА

Специальность 05.23.03 − Теплоснабжение, вентиляция,
кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение

Диссертация
на соискание ученой степени доктора технических наук

Научный консультант −
д.т.н., профессор **Бодров Валерий Иосифович**

Тольятти - 2018

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 7
Глава 1. АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МИКРОКЛИМАТА 16
1.1. Системы обеспечения параметров микроклимата 16
1.1.1. Пассивные элементы систем обеспечения параметров микроклимата .. 20
1.1.2. Активные элементы систем обеспечения параметров микроклимата 28
1.2. Базовые основы аэродинамики систем обеспечения микроклимата 55
1.2.1. Теория смешивания потоков профессора П.Н. Каменева 55
1.2.2. Коэффициенты местных сопротивлений в тройниках 59
1.3. Аэродинамика естественной вентиляции и аэрации 65
1.3.1. Аэродинамические коэффициенты здания 65
1.3.2. Аэрация 68
1.3.3. Аэродинамический расчет систем канальной естественной вентиляции 69
1.3.4. Системы естественной горизонтальной вентиляции 73
1.3.5. Естественное проветривание подземных сооружений 75
1.4. Термодинамические обоснования расчета систем обеспечения параметров микроклимата 78
1.4.1. Общий подход к выявлению движущих сил тепломассопереноса 78
1.4.2. Тепломассообмен в насыпи биологически активного сырья 81
1.4.3. Потенциал влажности как движущая сила тепломассопереноса 88
1.5. Методологический подход к совершенствованию систем обеспечения микроклимата 95
1.6. Выводы по главе 1 99
Глава 2. АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ МНОГОЭТАЖНЫХ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ 101
2.1. Аэродинамическая модель системы вентиляции 101

2.1.1. Анализ методов расчета потерь давления в системах 101
2.1.2. Физико-математическая модель системы естественной вытяжной вентиляции 103
2.2. Натурные исследования естественной вентиляции типового жилого дома .. 110
2.2.1. Задачи и методика проведения исследования 110
2.2.2. Анализ результатов натурных исследований систем вентиляции 118
2.3. Сопоставление результатов аналитических и натурных исследований 122
2.4. Уточнение методики аэродинамического расчета систем естественной вентиляции для зданий с теплыми чердаками 128
2.5. Анализ результатов расчета по уточненной методике 132
2.6. Последствия нерасчетных режимов работы систем естественной вентиляции ……..138
2.7. Комбинированная естественно-механическая система вентиляции 139
2.8. Выводы по главе 2 142
Глава 3. ОБЕСПЕЧЕННОСТЬ ПАРАМЕТРОВ МИКРОКЛИМАТА ПОДЗЕМНЫХ ПЕШЕХОДНЫХ ПЕРЕХОДОВ 144
3.1. Физико-математическая модель аэродинамических процессов в подземных пешеходных переходах 144
3.2. Лабораторные исследования динамики воздухообмена в подземных пешеходных переходах 153
3.2.1. Методика экспериментальных исследований 153
3.2.2. Аэродинамические характеристики модели перехода без внешних препятствий 158
3.2.3. Сопоставление экспериментальной динамики воздушных потоков с теорией профессора П.Н. Каменева 161
3.2.4. Аэродинамические характеристики модели перехода при наличии внешних препятствий 165
3.2.5. Аналитическое представление результатов исследований 167
3.3. Натурные исследования интенсивности естественного воздухообмена переходов 169

3.4. Коэффициент обеспеченности воздухообмена в тоннелях подземных пешеходных переходов при естественной вентиляции 171
3.5. Практические рекомендации по повышению обеспеченности параметров микроклимата в подземных пешеходных переходах 175
3.6. Выводы по главе 3 179
Глава 4. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМ АКТИВНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ ДЛЯ СУШКИ БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНОГО СЫРЬЯ 181
4.1. Термодинамическая трактовка построения линий постоянных потенциалов и процессов тепломассообмена на *I–d*–θ-диаграмме 181
4.1.1. Классическая теплофизическая модель тепломассообмена в процессе сушки растительного сырья 181
4.1.2. Теплофизическая модель тепломассообмена в процессе хранения сочного растительного сырья 189
4.1.3. Графоаналитические исследования *I–d*–θ-диаграммы 192
4.1.4. Построение процессов тепломассообмена в процессе сушки 206
на *I–d*–θ-диаграмме 206
4.1.5. Построение процессов тепломассообмена на *I–d*–θ-диаграмме 210
при различных способах обработки приточного воздуха 210
4.2. Использование естественных источников энергии в процессах сушки и хранения биологически активного сырья 217
4.2.1. Исследования динамики изменения параметров атмосферного воздуха как агента сушки 217
4.2.2. Исследования динамики изменения параметров атмосферного воздуха как источника естественного холода 222
4.3. Натурные исследования процессов сушки и хранения растительного сырья 225
4.3.1. Экспериментальные исследования процесса сушки 227
4.3.2. Исследование эффективности использования солнечных коллекторов 232
4.3.3. Экспериментальные исследования параметров микроклимата при хранении сочного растительного сырья 234

4.4. Инженерные методы расчета режимов работы систем вентиляции 241
4.4.1. Инженерная методика расчета тепломассопереноса в процессе сушки на основе градиента потенциала влажности 241
4.4.2. Примеры расчета процесса сушки с помощью *I–d–*θ-диаграммы 243
4.4.3. Инженерная методика расчета режимов работы систем обеспечения микроклимата при хранении биологически активного сырья 247
4.5. Выводы по главе 4 253
Глава 5. ОБЕСПЕЧЕННОСТЬ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАРУЖНЫХ ОГРАЖДЕНИЙ НЕОТАПЛИВАЕМЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ 255
5.1. Нормирование сопротивления влагопередаче наружных ограждающих конструкций 255
5.1.1. Использование аналогии процессов тепло- и влагопереноса для расчета требуемого сопротивления влагопередаче 255
5.1.2. Ограничения при расчете сопротивления влагопередаче наружных ограждений 264
5.2. Нормирование величины сопротивления влагопередаче 272
5.2.1. Методический подход к определению требуемого сопротивления влагопередаче 272
5.2.2. Методика расчета коэффициента влагообмена 273
5.3. Экспериментальные исследования тепловлажностных характеристик внутренних поверхностей ограждающих конструкций 276
5.3.1. Объект и метод проведения исследований 276
5.3.2. Анализ результатов натурных экспериментов 279
5.3.3. Экспериментальное определение разности потенциалов влажности ... 283
5.4. Расчетные параметры наружного и внутреннего воздуха 287
5.5. Методика расчета теплотехнических характеристик и влажностного режима наружных ограждений неотапливаемых сельскохозяйственных зданий 290
5.6. Выводы по главе 5 294

Глава 6. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ МИКРОКЛИМАТА 296
6.1. Технико-экономическое обоснование применения механической вентиляции в многоэтажных жилых домах 296
6.2. Показатели эффективности систем обеспечения параметров микроклимата при сушке и хранении биологически активного сырья 298
6.2.1. Коэффициент обеспеченности сохранности травы и зерна 298
6.2.2. Экономическая эффективность 299
использования систем солнечного подогрева 299
6.2.3. Коэффициент обеспеченности сохранности СРС 302
6.3. Оценка экономической эффективности реконструкции теплового контура производственного сельскохозяйственного здания 304
6.4. Выводы по главе 6 308
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 309
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ 312
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 316
ПРИЛОЖЕНИЯ 337

ВВЕДЕНИЕ

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 автомобильными 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 энергоэффективных систем обеспечения параметров микроклимата 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. Не-

стеренко, 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 тепло-

физических 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-θ- диаграмме влажного воздуха интенсивности тепломассопереноса и параметров термодинамического равновесного состояния в системе «влажный воздух – биологически активный 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 сис-

темного 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–θ-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 сельскохозяйственных 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 тепломассобменных 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 влагопроводности 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: правомерностью 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.

Глава 1. АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МИКРОКЛИМАТА

1.1. Системы обеспечения параметров микроклимата

Поддержание заданных метеорологических условий в помещении является основным требованием к системам обеспечения микроклимата. Соответствие санитарно-гигиеническим нормам таких параметров микроклимата как температура внутреннего воздуха $t_в$, относительная влажность $\varphi_в$, подвижность воздуха $v_в$, газовый состав и запыленность обеспечивают нормальное самочувствие человека и высокую производительность его труда. На ощущение комфортности оказывают влияние радиационная температура помещения t_R и температура внутренних поверхностей наружных ограждений $\tau_{в.п}$.

Проектированию, эксплуатации и повышению энергоэффективности систем обеспечения микроклимата в многоэтажных жилых зданиях (МЖД), а также вопросам внешней и внутренней аэродинамики зданий посвящены труды В.Н. Богословского [22, 27], Л.Д. Богуславского [29, 30], В.В. Батурина [11, 12], Б.Ф. Васильева [54], М.М. Грудзинского [88], П.Н. Каменева [126, 130], В.Е. Константиновой [143], И.Ф. Ливчака Е.Г. [172, 173], Малявиной [189, 190], Э.И. Реттера [231, 232], Ф.Л. Серебровского [46], Ю.А. Табунщикова [269], В.Н. Талиева [270], В.П. Титова [275] и других отечественных и зарубежных ученых.

В производственных зданиях параметры микроклимата должны также соответствовать технологическим требованиям. Специальные требования могут быть обусловлены особенностями протекания технологического процесса, работы оборудования, физико-механическим состояниям сырья и т.п. Особенностям проектирования систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха промышленных зданий посвящены работы В.В. Батурина [11, 12], М.Ф. Бромлея [48], А.М. Гримитлина [84], М.И. Гримитлина [57, 85, 86, 87], И.И. Елинского [100], Г.М. Позина [57,221], В.Н. Посохина [224], С.А. Рысина [239], И.Г. Староверова

[265], В.М. Эльтермана [302], Т.А. Фиалковской [280], Е.А. Штокмана [58] и многих других отечественных ученых.

По условиям формирования и технологическим требованиям к параметрам микроклимата в помещениях (температура, относительная влажность, подвижность, газовый состав воздуха, температура на внутренних поверхностях наружных ограждений) производственные сельскохозяйственные здания и сооружения относятся к особому классу [35]. Поддержание этих параметров в заданных пределах обеспечивает расчетную продуктивность животных и птиц, т.е. позволяет минимизировать затраты кормов, времени и средств на их выращивание и уход [35]. Изучению влияния параметров внутренней среды на физиологическое состояние животных посвящены работы А.Г. Егиазарова [97, 98], В.А. Аликаева [2], Валова В.М. [50], А.П. Огнева [210], В.И. Бодрова [35] и других исследователей.

Достаточно полно изучены параметры окружающей среды, влияющие на качество сочного растительного сырья в период хранения [101, 211, 335]. Поддержание требуемых технологических параметров в овощекартофелехранилищах позволяет свести к минимуму микробиологическую убыль продукции в период хранения, приближая ее к естественной убыли. При заготовке грубых кормов основной задачей в процессе сушки травы является наиболее полное сохранение питательных веществ (кормовых единиц (КЕ)) и витаминов.

Поддержание требуемых параметров внутреннего воздуха в зданиях и сооружениях осуществляется посредством систем обеспечения микроклимата, которые включают в себя пассивные элементы – ограждающие конструкции и активные – системы отопления, вентиляции, кондиционирования воздуха и холодоснабжения.

Повышение продуктивности животных, питательных свойств заготавливаемых грубых кормов и снижение потерь СРС при хранении однозначно характеризуются степенью совершенства систем обеспечения микроклимата. Экономический подход к вопросам повышения продуктивности животных, улучшение качества грубых кормов и качества хранения СРС включают в себя не только показатели энергоемкости систем формирования параметров микроклимата сооружений,

но и количественные показатели повышения фактической продуктивности или сохранности.

Наиболее полно сохранность СРС в процессе хранения, продуктивность сельскохозяйственных животных и сохранность питательных веществ в процессе заготовки грубых кормов оцениваются обобщенными показателями, комплексно учитывающими основные факторы сохранности питательных свойств СРС (коэффициент эффективности хранения $\eta_х$), повышения продуктивности животных (коэффициент эффективности содержания животных $\eta_ж$), повышения качества грубых кормов (коэффициент сохранности питательных веществ в процессе сушки травы $\eta_{с.т}$) [35].

Коэффициент, характеризующий эффективность хранения СРС, $\eta_х$ включает следующие факторы: коэффициент эффективности обеспечения микроклиматических параметров внутреннего воздуха по периодам хранения $\eta_м$, показывающий эффективность поддержания параметров микроклимата посредством объемно-планировочных и конструктивных решений зданий, предусмотренных при строительстве $\eta_м^А$, и инженерных решений систем кондиционирования воздуха $\eta_м^Е$, выполняемых в процессе эксплуатации. Коэффициенты эффективности $\eta_к^{СРС}$ или $\eta_к^ж$ характеризуют качество закладываемой на хранение продукции или физиологические показатели животных. Коэффициент эффективности расчетных условий эксплуатации систем обеспечения параметров микроклимата $\eta_э$ включает надежность работы систем кондиционирования воздуха $\eta_э^Е$ и квалификацию работников сельского хозяйства, эксплуатирующих данное направление производства $\eta_э^к$. Коэффициент обеспеченности сохранности питательных свойств травы $\eta_{с.т}$ наиболее полно оценивается коэффициентами обеспеченности качества скошенной травы $\eta_{к.т}$ и обеспеченности параметров воздуха в процессе сушки $\eta_{м.в}$.

Факторы, влияющие на значения эффективности поддержания параметров микроклимата $\eta_м$, качества закладываемой продукции $\eta_к$ и эффективности экс-

плуатации $\eta_э$, не зависят друг от друга. Поэтому коэффициент обеспеченности появления этих комплексных параметров равен их произведению [35]:

$$\eta_х = \eta_х^{max} \eta_м \eta_к \eta_э . \qquad (1.1)$$

Коэффициент эффективности поддержания нормируемых параметров микроклимата равен $\eta_м = \eta_м^A \eta_м^E$. Значения $\eta_м^A$ формируются, обосновываются и количественно характеризуются при проектировании хранилищ, а значения $\eta_м^E$ – в процессе эксплуатации систем поддержания параметров микроклимата.

Характеризующий выдерживание во времени оптимальных параметров среды коэффициент $\eta_м^E$ в хранилищах, оборудованных САВ, зависит от следующих независимых друг от друга коэффициентов эффективности [35]:

$$\eta_м^E = \eta_м^о \eta_м^в \eta_м^\varphi \eta_м^L , \qquad (1.2)$$

где $\eta_м^о$ – коэффициент эффективности сохранности СРС от применяемых систем воздушного отопления; $\eta_м^в$ – коэффициент, учитывающий дополнительную усушку продукции от нагрева воздуха в вентиляторах; $\eta_м^\varphi$ – коэффициент эффективности сохранности сырья, учитывающий отклонение относительной влажности поступающего в насыпь воздуха от равновесных значений; $\eta_м^L$ – коэффициент эффективности, учитывающий отклонение удельных расходов воздуха от оптимальных.

Коэффициент эффективности эксплуатации хранилищ в расчетных условиях

$$\eta_э = \eta_э^р \eta_э^з \eta_э^у \qquad (1.3)$$

зависит от коэффициентов эффективности: равномерности распределения воздуха в массе сырья $\eta_э^р$; параметров микроклимата при нерасчетной загрузке емкостей $\eta_э^з$; параметров микроклимата в хранилище при равномерной реализации продукции $\eta_э^у$ [35].

1.1.1. Пассивные элементы систем обеспечения параметров микроклимата

Поскольку здания и сооружения выступают в роли основных потребителей энергии, одним из направлений по энергосбережению является снижение их уровня энергопотребления путем повышения качества проектирования. Введение новых, более жестких норм по энергосбережению определило переход к проектированию и строительству зданий с повышенным уровнем теплозащиты, что нашло отражения в действующих в настоящее время нормах СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий (актуализированная редакция СНиП 23-02-2003) [261].

Нормируемое значение приведенного сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции, $R_0^{норм}$, м$^2\cdot$°С/Вт, определяется по формуле [261]:

$$R_0^{норм} = R_0^{тр} m_р, \qquad (1.4)$$

где $R_0^{тр}$ – базовое значение требуемого сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции, м$^2\cdot$°С/Вт, принимаемое в зависимости от градусо-суток отопительного периода; $m_р$ – коэффициент, учитывающий особенности региона строительства, принимаемый для стен не менее $m_р$ = 0,63, для светопрозрачных конструкций не менее $m_р$ = 0,95, для остальных ограждающих конструкций не менее $m_р$ = 0,80.

В случае реконструкции зданий, а также для помещений зданий с влажным или мокрым режимом приведенное сопротивление теплопередаче R_0, м$^2\cdot$°С/Вт, ограждающих конструкций зданий следует принимать не менее нормируемого значения $R_0^{норм}$, м$^2\cdot$°С/Вт, определяемого по формуле [261]:

$$R_0 \geq R_0^{норм} = \frac{n(t_в - t_н)}{\Delta t^н \alpha_в}, \qquad (1.5)$$

где n – коэффициент, учитывающий зависимость положения наружной поверхности ограждающих конструкций по отношению к наружному воздуху; $\Delta t^н$ – нормируемый температурный перепад между температурой внутреннего воздуха $t_в$ и температурой внутренней поверхности $\tau_{в.п}$ ограждающей конструкции, °С; $\alpha_в$ – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающей конструкции, Вт/(м$^2\cdot$°С).

Толщина утепляющего слоя в наружных ограждениях определяется, исходя из соотношения [261]:

$$R_0 = \frac{1}{\alpha_в} + \sum_s R_s + \frac{1}{\alpha_н}, \qquad (1.6)$$

где $\alpha_н$ – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждающей конструкций, Вт/(м^2·°С); R_s – термическое сопротивление однородного слоя конструкции или замкнутой воздушной прослойки, м^2·°С/Вт, определяемое для материальных слоев толщиной δ_s, м, с коэффициентом теплопроводности λ_s, Вт/(м·°С), по формуле:

$$R_s = \delta_s / \lambda_s . \qquad (1.7)$$

Нормируемой величиной в (1.5) для жилых, общественных и производственных зданий является удельный тепловой поток через ограждение $q^н = \Delta t^н \alpha_в$, Вт/м^2, т.к. основной функцией наружных ограждающих конструкций является защита температурных параметров внутренней среды от нестационарных внешних воздействий.

Из анализа формулы (1.6) видно, что влияние величины $\alpha_в$ на значение сопротивления теплопередаче ограждения R_0 незначительно. Однако при нормировании сопротивления теплопередаче значение коэффициента теплоотдачи внутренней поверхности ограждающих конструкций $\alpha_в$ является определяющим. В помещениях сельскохозяйственных зданий величина $\alpha_в$ в зависимости от колебания температур $t_в$ и $\tau_{в.п}$, а также наличия или отсутствия конденсата на внутренних поверхностях ограждения имеет переменные значения. В результате наблюдается несоответствие реальных и расчетных значений $\alpha_в$, на что указывается в ряде исследований по физико-техническим особенностям формирования параметров микроклимата в производственных сельскохозяйственных зданиях [6, 42, 51, 64, 98, 101] и др.

Производственные сельскохозяйственные здания выделены в особый класс сооружений из-за наличия в них постоянно действующих в процессе эксплуатации явных тепловыделений, влаговыделений, сравнительно низкой температуры $t_в$ и высокой относительной влажности $\varphi_в$ воздуха. Эти особенности не позволяют

рассчитывать теплотехнические характеристики ограждающих конструкций сельскохозяйственных зданий по аналогии с гражданскими и промышленными согласно действующих норм [261] из-за больших (до 200…250 %) погрешностей в расчетах даже при принятии технологических параметров внутреннего воздуха. На это обстоятельство указывают как отечественные, так и зарубежные исследователи [34, 51, 98, 101, 121, 134, 216, 311, 336]. Однако эти факты не нашли отражения в действующих нормах по расчету теплотехнических характеристик наружных ограждений сельскохозяйственных зданий.

Таким образом, можно сделать вывод, что нормирование сопротивления теплопередаче наружных ограждений по (1.4) не может быть принято за основу при расчетах теплотехнических характеристик теплового контура производственных сельскохозяйственных зданий, как по точности инженерных расчетов, так и с методической точки зрения.

Предложенный профессором В.И. Бодровым [34, 42] методологический подход обосновывает при наличии в неотапливаемых сельскохозяйственных зданиях в холодный период года постоянно действующих явных тепловыделений от животных, птиц или хранящегося сочного растительного сырья $Q_б$, Вт, принимать теплофизические характеристики наружных ограждений, обеспечивающих такой нормированный удельный тепловой поток через них $q_б^н$, Вт/м^2, чтобы предотвратить понижение температуры внутреннего воздуха $t_в$ ниже требуемой при расчетной температуре наружного воздуха $t_н$ ($\Sigma Q = 0$). Приведенная трактовка энергетического баланса здания обосновывает принятие за основу нормирования сопротивления теплопередаче наружных ограждений величины $q_б^н$:

$$R_0^{тр} = \frac{(t_в - t_н)n}{q_б^н}; \qquad (1.8)$$

$$q_б^н = \frac{(1-m)Q_б}{F}, \qquad (1.9)$$

где $F = F_{ст} + F_{покр}$ – площадь надземных стен и покрытия, м^2; m – коэффициент, учитывающий долю теплопотерь через полы, подземные и обвалованные части зданий: m = 0,03…0,05 для надземных; m = 0,08…0,10 для зданий с обваловкой на

0,50 наружных стен по высоте; m = 0,25…0,30 для заглубленных зданий и буртов [35].

Явные тепловыделения животных $Q_{б}^{ж}$, Вт, при их расчетном количестве $z_{ж}$, шт., в помещении равны [35]:

$$Q_{б}^{ж} = q_{ж} z_{ж} k_1 k_2 k_3, \tag{1.10}$$

где $q_{ж}$ – явная теплота, выделяемая одним животным, Вт/гол.; k_1 – коэффициент отклонения тепловыделений животных в зависимости от температуры воздуха в помещении; k_2 – коэффициент, учитывающий фактическое число животных в помещении по сравнению с расчетным; k_3 – коэффициент, учитывающий тепловыделения животных, находящиеся в состоянии покоя (в ночное время); для КРС и свиней k_3 = 0,8; для птиц k_3 = 0,6.

Количество явной теплоты, выделяемое птицами [35]:

$$Q_{б}^{пт} = z_{пт} p_{пт} q_{пт} k_1 k_2 k_3, \tag{1.11}$$

где $p_{пт}$ – масса одной птицы, кг; $q_{пт}$ – удельные тепловыделения одной птицей, Вт/кг.

Явные тепловыделения сочного растительного сырья при расчетной вместимости хранилища $G_{р}$, т, составляют [35]:

$$Q_{б}^{СРС} = q_{СРС} G_{р}, \tag{1.12}$$

где $q_{СРС}$ – удельные явные тепловыделения СРС, Вт/т.

Рассчитанная по (1.8) и (1.9) величина требуемого сопротивления теплопередаче $R_0^{тр}$ представляет собой осредненное значение сопротивления теплопередаче стен и покрытий. Сопротивление теплопередаче покрытия $R_{0\,покр}$ определяется из соотношения [35]:

$$R_0^{тр} = \frac{\left(F_{ст} + F_{покр}\right)}{\left(F_{ст} / R_{0\,ст}^{д} + F_{покр} / R_{0\,покр}\right)}, \tag{1.13}$$

где $R_{0\,ст}^{д}$ – действительное сопротивление теплопередачи стен, м^2·°С/Вт.

Преимуществом изложенной методики нормирования сопротивления теплопередаче наружных ограждений является одновременный учет объемно-планировочных решений зданий и индивидуальных биологических и теплофизи-

ческих показателей животных, птицы, хранящегося сырья. Также следует отметить, что при расчете по формуле (1.8), не требуется определять нормируемый температурный перепад $\Delta t^{н}$ между температурой внутреннего воздуха $t_{в}$ и температурой внутренней поверхности $\tau_{в.п}$ ограждающей конструкции, а также коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности ограждающей конструкций $\alpha_{в}$ в нестационарных условиях тепломассообмена, тем самым, добиваясь объективных значений теплозащитных свойств теплового контура.

Однако предложенная методика расчета теплофизических характеристик теплового контура неотапливаемых производственных сельскохозяйственных зданий не учитывает динамику влажностного режима наружных ограждений в круглогодичном цикле эксплуатации сооружений.

Обеспечение требований по тепловой защите не является единственной характеристикой, обеспечивающей энергоэффективность здания. С повышением влажности строительных материалов увеличивается их теплопроводность и происходит снижение теплозащитных свойств. Стабильный влажностный режим обеспечивает долговечность ограждающих конструкций. Следовательно, при проектировании наружных ограждений необходимо особое внимание уделять также защите ограждающих конструкций от переувлажнения.

На необходимость учета влажностного режима наружных ограждений зданий при расчете теплотехнических характеристик материалов из отечественных ученых одним из первых указал В.Д. Мачинский [194, 195]. Он доказал, что движение влаги сквозь ограждающие конструкции осуществляется за счет разности упругостей водяных паров по обе стороны ограждения. Методики расчета интенсивности влагопереноса через ограждение в стационарных условиях разрабатывались и уточнялись Ф.В. Ушковым [278], А.М. Шкловером [298], Ф.У. Франчуком [283], В.М. Ильинским [112, 113], Богословским В.Н. [27], К.Ф. Фокиным [281]. Аналогичные работы проводились в США [328, 335], в Германии [309, 310]. В качестве главного механизма переноса влаги в данных работах принята паропроницаемость (диффузия водяного пара).

Теория диффузии водяного пара предполагает, что перемещение водяного

пара через ограждение происходит посредством диффузии, а движущей силой влагопереноса является разность величин упругости водяного пара с одной и другой стороны ограждения [281].

Удельный поток влаги i, кг/(м^2·ч), в любом сечении конструкции пропорционален градиенту упругости водяного пара:

$$i = -\mu \nabla e, \tag{1.14}$$

где μ – коэффициент паропроницаемости материала, кг/(м·ч·Па); ∇e – градиент упругости водяных паров, Па/м.

Дифференциальное уравнение для диффузии пара при нестационарных условиях, имеет вид [281]:

$$\frac{\partial e}{\partial z} = \frac{\mu}{1000 \xi \rho_0} \cdot \frac{\partial^2 e}{\partial x^2}, \tag{1.15}$$

где ρ_0 – плотность материала в сухом состоянии, кг/м^3; z – продолжительность диффундирования водяного пара, ч.

Процесс паропроницания сопровождается процессом сорбции или десорбции влаги материалом. Влажность материала меняется в зависимости от увеличения или уменьшения упругости водяных паров в порах материала [281]. Зависимость между массовой влажностью материала $\omega_в$, %, и относительной влажностью воздуха φ, %, изображается графически в виде изотерм сорбции-десорбции. Процессы сорбции-десорбции водяного пара строительными материалами достаточно полно изучены. Результаты исследований представлены в работах отечественных и зарубежных авторов [1, 82, 177, 281, 282, 305, 306, 318, 332].

Теория влагопроводности, предложенная А.В. Лыковым [179], учитывает перемещение сквозь строительные конструкции не только парообразной, но и жидкой фазы влаги. Поток влаги складывается из изотермического и термоградиентного, соответственно, в качестве движущих сил приняты градиенты влажности материала и температуры.

В изотермических условиях удельный поток влаги i, кг/(м^2·ч), равен сумме потоков пара $i_п$ и жидкости $i_ж$:

$$i = i_п + i_ж = -a_m \rho_0 \nabla u, \tag{1.16}$$

где a_m – коэффициент потенциалопроводности молекулярного переноса влаги в материале, м^2/ч; ∇u – градиент влагосодержания материала, кг/(м·кг сух. в-ва).

В неизотермических условиях удельный поток влаги i пропорционален градиенту влагосодержания материала ∇u, кг/(м·кг сух. в-ва), и градиенту температуры ∇t, ºС/м:

$$i = -a_m \rho_0 \nabla u - a_m \rho_0 \delta_t \nabla t, \qquad (1.17)$$

где δ_t – коэффициент термовлагопроводности, 1/ ºС.

При наличии температурного градиента в материале происходит движение жидкости в направлении снижения температуры, поскольку повышение температуры приводит к уменьшению поверхностного натяжения жидкости и увеличению ее давления [179].

Дифференциальное уравнение термовлагопроводности имеет вид [179]:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = k \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + k\delta \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}. \qquad (1.18)$$

Зависимость (1.17) применяют для расчета процессов переноса влаги при сверхгигроскопической влажности в однослойных ограждающих конструкциях. При этом вторым слагаемым уравнения пренебрегают, т.к. градиент температуры в конструкциях обычно небольшой.

Аналитическое решение дифференциальных уравнений (1.15) и (1.18) осуществляется методом конечных разностей, что ограничивает возможность их широкого применения для расчета увлажнения ограждающих конструкций при нестационарных условиях.

Предложенные некоторыми отечественными, например О.Е. Власовым [59, 60], В.Г. Гагариным [235], А.С. Эпштейном [303], Р.Е. Брилингом [47], К.Ф. Фокиным [281], и зарубежными [308, 312, 320, 323] учеными способы расчета влажностного режима строительных конструкций носят ограниченный, применимый только для конкретных случаев характер.

Расчет нормируемого сопротивления паропроницанию ограждающих конструкций зданий, согласно требованиям СП 50.13330.2012, основывается на теории диффузии водяного пара.

Сопротивление паропроницанию $R_п$, м^2·ч·Па/мг, должно быть не менее наибольшего из следующих требуемых сопротивлений паропроницанию [261]:

1) из условия недопустимости накопления влаги в ограждающей конструкции за годовой период эксплуатации:

$$R_{п1}^{тр} = \frac{(e_в - E)R_{п.н}}{E - e_н}; \qquad (1.19)$$

2) из условия ограничения влаги в ограждающей конструкции за период с отрицательными средними месячными температурами наружного воздуха:

$$R_{п2}^{тр} = \frac{0{,}0024 z_0 (e_в - E_0)}{\rho_w \delta_w \Delta w + \eta}. \qquad (1.20)$$

Парциальное давление водяного пара внутреннего воздуха $e_в$, Па, при расчетной температуре $t_в$ и относительной влажности воздуха $\varphi_в$, %, определяется по формуле:

$$e_в = (\varphi_в / 100) E_в, \qquad (1.21)$$

где $E_в$ – максимальная упругость водяного пара, Па, при температуре внутреннего воздуха $t_в$, ºС.

Сопротивление паропроницанию $R_{пi}$, м^2·ч·Па/мг, однослойной или одного слоя многослойной ограждающей конструкции равно:

$$R_{пi} = \delta_i / \mu_i, \qquad (1.22)$$

где δ_i – толщина слоя ограждающей конструкции, м; μ_i – коэффициент паропроницаемости материала слоя ограждающей конструкции, мг/(м·ч·Па).

Сопротивление паропроницанию многослойной ограждающей конструкции равно сумме сопротивлений паропроницанию составляющих ее слоев [261]. В инженерных расчетах сопротивлениями влагообмену у внутренней и наружной поверхностей ограждения пренебрегают ввиду их малой величины.

Расчет по данной методике основан на механизме паропроницаемости, т.е. перемещении только парообразной влаги. Для обеспечения реальных требований к тепловой защите наружных ограждающих конструкций также необходим учет переноса капельной влаги.

Основным недостатком нормирования сопротивления паропроницанию наружных ограждений производственных сельскохозяйственных зданий, как и зданий иного функционального назначения, по предлагаемой в [261] методике является физическая неопределенность, многочисленность и отсутствие логической связи между входящими в нее величинами. Особенно данные недостатки проявляются при расчете нестационарных процессов переноса влаги, когда субъективные факторы сводят на нет точность определения искомых величин. Поэтому данная методика при инженерных расчетах требует уточнения и точной количественной апробации входящих в нее физических величин.

1.1.2. Активные элементы систем обеспечения параметров микроклимата

Системы обеспечения микроклимата гражданских зданий

Выбор принципиальных решений по конструированию систем обеспечения микроклимата зависит от функционального назначения помещений и архитектурно-планировочных решений объекта.

Возможные системы вентиляции жилых домов были изучены и представлены в [168, 169]: с вытяжными каналами в каждой жилой комнате и в санитарно-кухонном узле; с вытяжными каналами только в санитарно-кухонном узле; с приточными устройствами в комнатах и вытяжными каналами в санитарно кухонном узле; с приточными устройствами и вытяжными каналами в комнатах и вытяжными каналами в санитарно-кухонном узле. Наиболее рациональной признана схема с приточным устройством в комнатах и вытяжными каналами в санитарно-кухонном узле.

При естественной вентиляции жилых зданий приток наружного воздуха преимущественно осуществляется через неплотности наружных ограждений. Однако воздухопроницаемость современных оконных конструкций в закрытом состоянии не обеспечивает нормативного воздухообмена в квартирах. В результате в помещениях квартир может наблюдаться не только неполное удаление запахов, но и повышенная влажность, которая, вызывает образование плесени [170]. Отсутствие возможности плавного регулирования угла открытия форточек в окнах деревянных конструкций

приводит к необходимости «залпового» проветривания помещений, что, с точки зрения обеспечения комфортных условий проживания жильцов, не может считаться рациональным. Открытие фрамуг по всей высоте окна приводит к выхолаживанию нижней зоны помещения из-за недостаточности конвективной теплоты от отопительных приборов. Поэтому данный способ обеспечения нормативного притока воздуха в жилые помещения также нельзя считать комфортным [240, 294].

В настоящее время считается наиболее целесообразным для обеспечения расчетного притока наружного воздуха применение регулируемых приточных устройств [108, 171, 173, 174, 175, 176, 184, 225, 228, 236].

Удаление воздуха системами естественной вентиляции в типовых жилых домах, как правило, осуществляется через отверстия, расположенные в кухнях и санитарных узлах. Основными конструктивными элементами таких систем являются воздуховоды, выполненные в виде вертикальных каналов и горизонтальных коробов.

Схемы систем вытяжной вентиляции жилых зданий высотой до пяти этажей представлены на рисунке 1.1. Каналы могут быть как раздельными, так и объединенными в горизонтальный короб, расположенный на чердаке [22, 129, 130, 301]. В зданиях с кирпичными внутренними перегородками вентиляционные каналы устраивают в толще стен или в бороздах. При отсутствии кирпичных стен устраивают приставные каналы, которые в помещениях с нормальной влажностью воздуха выполняют из гипсовых и шлакоопилкогипсовых плит; с повышенной влажностью воздуха – из шлакобетонных или бетонных плит. В отдельных случаях каналы изготовлялись из стали или асбестоцементных плит. В крупнопанельных зданиях вентиляционные вертикальные каналы устраивают в стенах или перегородках в виде специальных вентиляционных панелей с каналами круглого, прямоугольного или овального сечений.

В зданиях высотой более пяти этажей схемы вытяжной вентиляции выполняются с вертикальным или с горизонтальными сборными каналами, располагаемыми через каждые четыре - шесть этажей (рисунок 1.2).

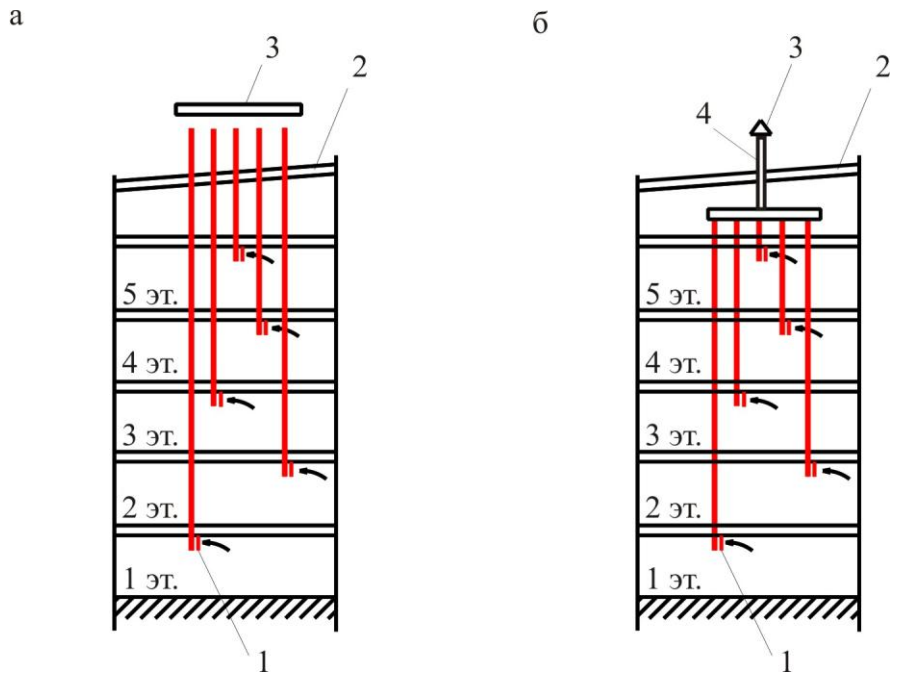


Рисунок 1.1 – Схемы естественной вытяжных систем вентиляции с вертикальными каналами для зданий до пяти этажей: а – с раздельными каналами; б – с объединенными каналами на чердаке; 1 – жалюзийные решетки; 2 – кровля; 3 – зонт; 4 – сборная шахта

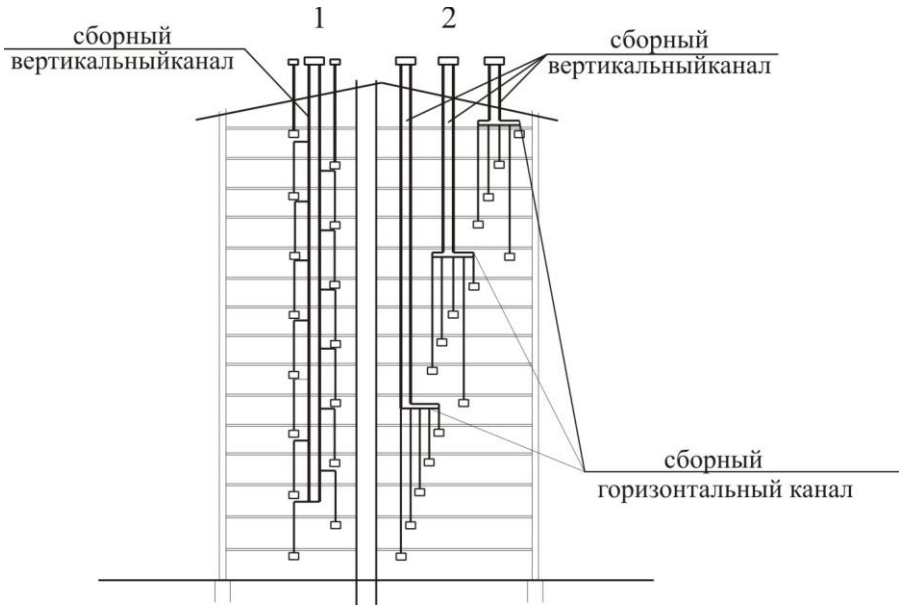


Рисунок 1.2 – Схема естественной вытяжных систем вентиляции многоэтажных зданий: 1 –с вертикальным сборным каналом; 2 –с горизонтальными сборными каналами

Такие схемы вентиляции многоэтажных зданий имеют ряд недостатков: большое аэродинамическое сопротивление систем; множество вентиляционных шахт, выводимых на крышу, нарушает целостность кровли.

В связи с этим разработаны системы вентиляционных каналов со спутниками (рисунок 1.3). Системы состоят из магистрального сборного канала большого сечения с параллельными каналами – спутниками малого сечения [168, 169, 250].

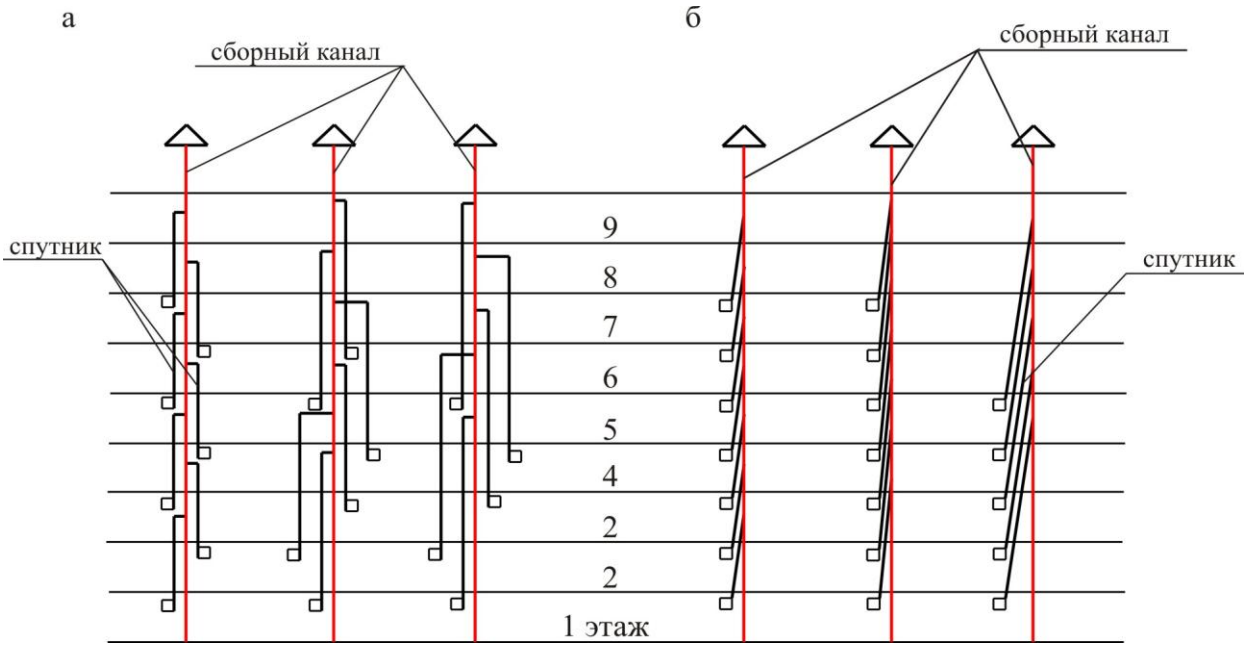


Рисунок 1.3 – Схемы вытяжных каналов со спутниками для девятиэтажных жилых домов: а – спутники параллельны сборному каналу; б – спутники расположены наклонно к сборному каналу

Перепуски могут осуществляться через 2, 3, 4 и 5 этажей и присоединяться к магистральному каналу под прямым или косым углом. Вентиляционная сеть образуется из унифицированных по высоте здания поэтажных блоков.

Типовым решением вытяжной вентиляции в многоэтажных крупнопанельных жилых зданиях массового строительства с 70-х годов является удаление воздуха из каждой квартиры двумя вентиляционными блоками, обслуживающими кухню и санитарные помещения (рисунок 1.4). При размещении кухни и санузла в одной зоне квартиры используется сдвоенный вентиляционный блок, имеющий отдельные магистральные каналы для кухни и санузла.

В 70-е годы XX века в жилищном строительстве стал широко применять теплый чердак (рисунок 1.5). На основании многочисленных исследований [115, 116, 212, 213, 226] были разработаны рекомендации по конструированию теплого чердака, систематизированные в работе [229]. В зданиях с теплым чердаком (рисунок 1.6) применяются унифицированные вентиляционные блоки со сборными магистральными каналами на высоту ($N_{эт}$ – 2) этажей здания, имеющего $N_{эт}$ этажей. Удаление воздуха из помещений на последних двух этажах здания осуществляется самостоятельными каналами рядом с магистральным в пределах вентиляционного блока.

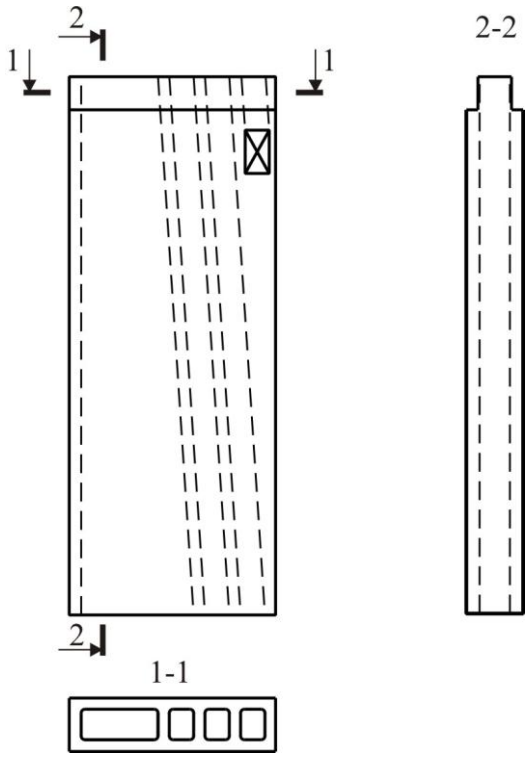


Рисунок 1.4 – Поэтажный вентиляционный блок

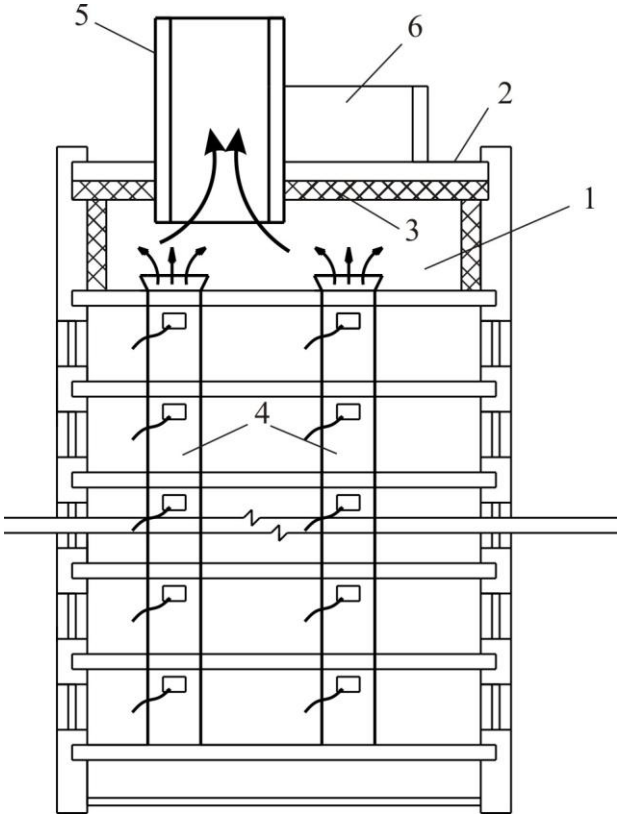


Рисунок 1.5 – Многоэтажное здание с теплым чердаком: 1 – чердак; 2 – плоская кровля; 3 – слой утеплителя; 4 – вытяжные каналы; 5 – вытяжная шахта; 6 – машинное отделение лифтов.

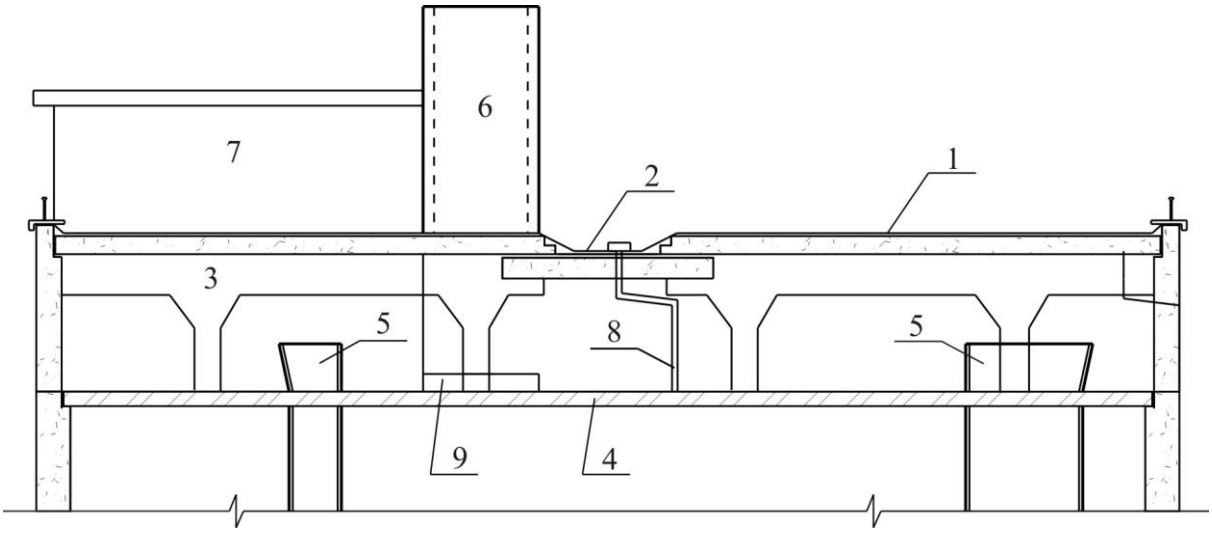


Рисунок 1.6 – Конструкция крыши с теплым чердаком: 1- панель покрытия; 2 – панель лотка; 3 – опорная рама чердака; 4 - панель чердачного перекрытия; 5 – оголовок вентиляционного блока; 6 – вытяжная шахта; 7 – машинное помещение лифта; 8 – водосточный стояк; 9 – поддон для сбора атмосферных осадков

Для выпуска вытяжного воздуха в теплый чердак на вентиляционных блоках устанавливаются специальные оголовки в форме диффузора, который служит для уменьшения потерь давления при выпуске воздуха из сборного канала в теплый чердак. Воздух из теплого чердака выпускается в атмосферу через вытяжную шахту, общую для одной секции дома. Вентиляционная шахта, примыкая к выступающему над кровлей машинному помещению лифта, возвышается над кровлей примерно на 2,5 метра. Её расчетная высота по отношению к окнам помещений на верхнем этаже зданий доходит до 6 м.

Вытяжная шахта устанавливается в средней части каждой секции чердака на приблизительно равном расстоянии от вентиляционных блоков. Размеры шахты определяются при расчете системы вытяжной вентиляции. Сборная вытяжная шахта не должна накрываться зонтом. Для защиты от атмосферных осадков под шахтой устраивается водосборный поддон.

Системы вентиляции с устройством зазора между вытяжной шахтой, установленной в утепленной кровле, и вытяжными каналами, т.е. с образованием теплого чердака были предложены с целью снижения потерь теплоты через покрытие и увеличения интенсивности естественной вентиляции. Но, несмотря на преимущества зданий с теплыми чердаками, существовали мнения о недопустимости массового

строительства систем вентиляции данного типа [142]. Это объясняется следующими причинами. Во-первых, становится опасным местное повышение или понижение температуры воздуха внутри чердачного пространства, поскольку градиент температуры воздуха может вызвать конвективные токи и разрегулировку всей системы, опрокидывание тяги внутри отдельных ветвей системы. Во-вторых, опасным представляется воздействие ветрового давления, которое может вызвать перетекание воздуха с наветренной стороны здания на заветренную через систему. В связи с этим такие системы можно применять лишь при относительно небольшом объеме чердачного пространства, большой высоте сборной шахты или механическом побуждении в системе при условии малой воздухопроницаемости ограждений чердака [143].

Применение механической вытяжной вентиляции для жилых зданий позволяет стабилизировать воздухообмен в помещениях различных этажей, однако это решение приводит к ряду технических и эксплуатационных сложностей: повышенные требования к герметичности вертикальных каналов, ограждений квартир, чердака; блоки индустриального изготовления не приспособлены к использованию в системах механической вентиляции.

Отказ от теплых чердаков и вывод всех вентблоков напрямую через кровлю с установкой дефлекторов на каждой шахте ухудшает архитектурные качества здания, вносит коренные изменения в типовом панельном строительстве и лишает возможности прокладки трубопроводов отопления, водостока, водопровода в пределах чердака.

Поддержание требуемых параметров микроклимата в производственных сельскохозяйственных зданиях

Поддержание конкретных параметров микроклимата в сельскохозяйственных зданиях по ветеринарным и биологическим требованиям, по периодам жизнедеятельности для каждого вида животных и птиц, хранящегося сочного растительного сырья вызвало необходимость отнести эти здания к особому классу не только по нормированию теплофизических характеристик наружных ограждаю-

щих конструкций, но и по расчету, проектированию и инженерному исполнению в них систем жизнеобеспечения [35].

По специфическим особенностям требуемых параметров микроклимата производственные сельскохозяйственные здания принято разделять на следующие типы: животноводческие, птицеводческие, хранилища сочного растительного сырья и установки для послеуборочной обработки (сушки) биологически активной продукции. В них температура внутреннего воздуха определяется спецификой производства и является переменной величиной. Например, в хранилищах температура меняется по периодам хранения овощей и фруктов, в птицеводческих помещениях для содержания бройлеров температура будет изменяться в зависимости от возраста птицы. Отвечающее биологическим, ветеринарным и технологическим требованиям состояние воздушной среды обеспечивается системами теплоподачи и вентиляции.

В животноводческих и птицеводческих постройках, выполненных как по типовым, так и по индивидуальным проектам, наибольшее распространение получили воздушные системы отопления. Отопительные функции этих систем сводятся к нагреванию наружного воздуха до температуры более высокой, чем заданная температура помещения, и подаче его в обслуживаемое помещение. Наружный воздух нагревается в теплообменниках горячей водой или паром, которые приготовляются в котельных, расположенных вне животноводческих зданий. Также считается перспективным применение систем лучистого газового обогрева [249]. К их преимуществам, по отношению к применяемым в типовых проектах водяным, паровым и воздушным системам отопления, а также комбинированным (водо-воздушным, паро-воздушным и т.п.), следует отнести: отсутствие котельной, наружных теплотрасс и теплообменников (нагревательных приборов, воздухонагревателей и т. п.); раздача теплоты равномерно по всему объему помещения (градиент температуры по высоте не более 0,1 °С/м); создание теплового комфорта у пола сельскохозяйственных зданий; возможность создания нормируемых температурных параметров в локальных объемах помещений; высокий КПД генераторов теплоты (более 90 %); обеспечение требуемого теплового режима как во

всем помещении, так и в отдельных его зонах при более низкой температуре воздуха (на 2…4 °С) [210]; возможность гибкого автоматического регулирования теплового режима в здании; малая тепловая инерционность систем теплоподачи.

Организация воздухообмена в производственных сельскохозяйственных зданиях осуществляется, как правило, по схемам «сверху вверх» и «сверху вверх, вниз», т.е. подача воздуха происходит в верхнюю зону, а удаление воздуха – из верхней и (или) нижней зон помещения. Однако, в зависимости от назначения помещения и принятой технологии содержания животных, свежий приточный воздух можно подавать как в верхнюю, так и нижнюю зону помещения [35]. Для равномерной подачи воздуха в зону размещения животных с допустимыми скоростями, как правило, применяют воздуховоды равномерной раздачи.

Наиболее экономически выгодным является применение систем естественной вентиляции сельскохозяйственных зданий за счет гравитационного Δp_t и ветрового Δp_v давлений или их суммы ($\Delta p = \Delta p_t + \Delta p_v$). Наличие в производственных сельскохозяйственных зданиях значительных явных избытков теплоты позволяет использовать как приточные, так и вытяжные системы с естественным побуждением. Подача воздуха осуществляется через подоконные или надоконные приточные щели, загрязненный воздух удаляется через утепленные шахты прямоугольного или круглого сечения. Аэродинамика и особенности расчета таких систем рассмотрены в разделе 1.3.

Удаление воздуха из животноводческих зданий естественным путем через шахты и фонари не всегда позволяет решить стоящие перед системами технологического микроклимата задачи. В животноводческих помещениях выделяется много тяжелых вредных газов, и их удаление требует организации механических систем с вытяжкой воздуха из нижней зоны, в частности из верхней зоны каналов навозоудаления.

Например, в свинарниках-маточниках рекомендуется удалять загрязненный воздух механической системой вентиляции по каналам, расположенным под полом рядом с каналами для удаления навоза (рисунок 1.7). Забор загрязненного воздуха этими системами проводится из верхней части канализационного канала

через щели или отверстия, расположенные выше уровня жидкости в канале не менее чем на 200 мм. Такая вытяжная система позволяет удалять вредные газы непосредственно из мест их выделения и предотвращает распространение их по всему помещению. Механическая вытяжка из подпольных канализационных каналов предусматривается при содержании животных на решетчатых полах. В этом же помещении необходимо в верхней зоне устраивать вытяжные шахты, расположенные равномерно по всей кровле.

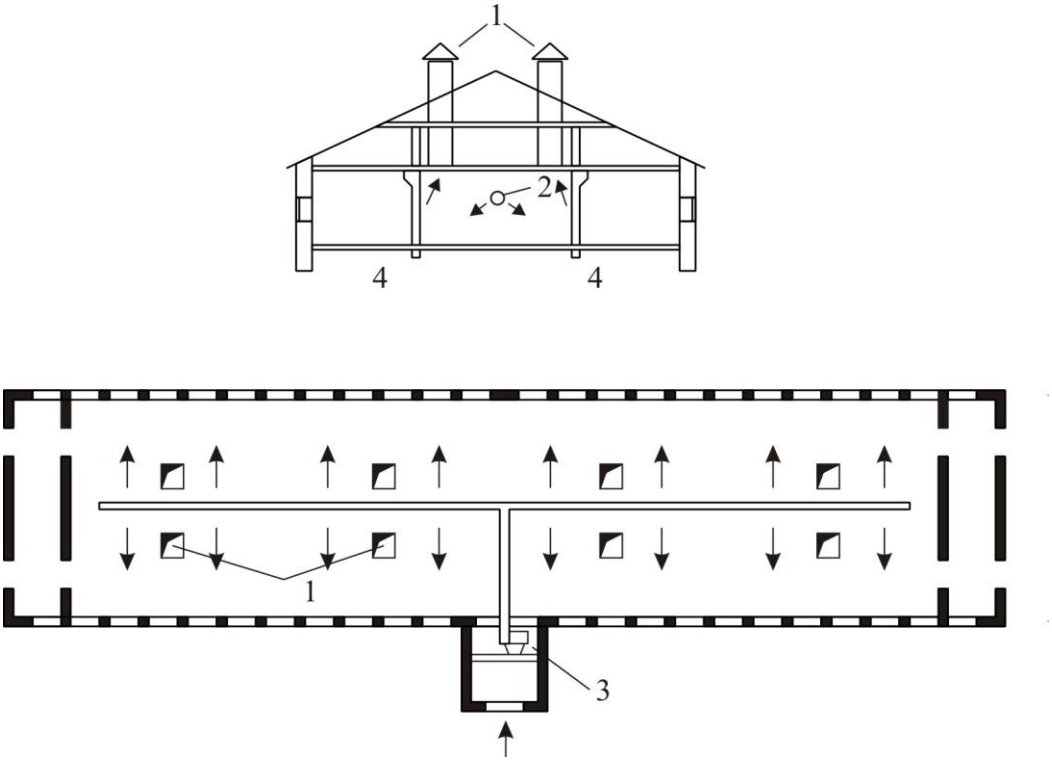


Рисунок 1.7 – Схема системы вентиляции свинарника-маточника: *1* – вытяжные шахты; *2* – приточные воздуховоды; *3* – вентиляционные каналы; *4* – вытяжные каналы; *5* – вытяжные осевые вентиляторы

Удаление воздуха может осуществляться с помощью вытяжных вентиляторов, расположенных в нижней части стены под окнами.

Сельскохозяйственные производственные здания не являются полностью неотапливаемыми даже при наличии наружных ограждений, теплотехнические характеристики которых соответствуют величинам, определенным по методике, изложенной в разделе 1.1.1. Это вызвано необходимостью удалять влагу, выделяемую в процессе жизнедеятельности животных $j_ж$, г/ч, и птиц $j_{пт}$, г/(ч·кг), хранящейся продукции $j_{СРС}$.

Минимальное количество наружного воздуха $L_{н.min}$, м^3/ч, для ассимиляции избытков влаги в помещении $G_{вл}$, г/ч, равно:

$$L_{н.\,min} = G_{вл} / \rho_в (d_{уд} - d_{пр}), \qquad (1.23)$$

где $G_{вл} = j_ж z$, $G_{вл} = j_{пт} p_{пт} z$, $G_{вл} = j_{СРС} G_р$ – количество влаги, выделяемой в помещении от животных, птиц, сочного растительного сырья соответственно, г/ч;

$d_{уд}$ и $d_{пр}$ – влагосодержания удаляемого и приточного воздуха, г/кг сух. в-ха.

Минимальные затраты теплоты на нагрев наружного воздуха:

$$Q_{наг} = c_в \rho_в L_{н\,min} (t_н^р - t_н). \qquad (1.24)$$

Наружная расчетная температура $t_н^р$, начиная с которой требуются затраты теплоты на нагрев приточного воздуха, определяется из теплового баланса каждого конкретного сельскохозяйственного здания по формуле:

$$t_н^р = t_в - \frac{Q_б}{F / R_0^{тр} + c_в \rho_в L_{н\,min}}, \qquad (1.25)$$

где $c_в$ – массовая теплоемкость воздуха, Вт·ч/(кг·°С).

Физический смысл температуры $t_н^р$: при понижении температуры наружного воздуха от $t_н^р$ до расчетной в холодный период года $t_н$ затраты теплоты на подогрев приточного воздуха увеличивается от 0 до $Q_{наг}$. В остальное время, когда $t_н > t_н^р$, в помещении имеются теплоизбытки.

В настоящее время системы поддержания расчетных параметров микроклимата в производственных сельскохозяйственных зданиях в стране находятся в катастрофическом состоянии. Отапливается не более 2…3 % коровников и помещений для откорма скота, построенных по типовым проектам [50, 51]. В холодный период года значения относительной влажности воздуха в животноводческих помещениях достигают 96…98 %, о чем свидетельствует постоянное наличие тумана в помещениях. Крупный рогатый скот выдерживает широкий диапазон отрицательных воздействий и выживает в этих условиях, но продуктивность его резко снижается. Запроектированные отопительные и вентиляционные системы часто не выполняются в полном объеме или функционируют только в начальный период, а после выхода их из строя не ремонтируются и не восстанавливаются. Поме-

щения эксплуатируются как неотапливаемые с неорганизованным воздухообменом.

Системы активной вентиляции для сушки травы и хранения биологически активного сырья

В настоящее время в технологии кормопроизводства наиболее перспективной считается искусственная сушка трав методом активного вентилирования, позволяющая заготавливать высококачественное сено в рассыпном, прессованном и измельченном виде в более короткие сроки, повысить качество корма в 1,7…2 раза по сравнению с естественной сушкой, снизить влияние погодных условий и сократить механические потери до 20 % [9, 16, 45, 46, 241, 268].

Искусственную сушку зеленых растений проводят в два этапа: провяливание травы в поле и досушка в специальных хранилищах принудительным вентилированием. На первом этапе влажность растительной массы снижается до 30…40 %, продолжительность периода воздушно-солнечной сушки не более суток. Принудительное вентилирование провяленной травы проводят, как правило, в хранилищах или под навесами, оборудованных установками с решетчатым полом (рисунок 1.8, а) или с помощью воздухораспределителей, расположенных непосредственно внутри скирды (рисунок 1.8, б). В течение первых двух суток продувку осуществляют непрерывно. В дальнейшем систему активной вентиляции (САВ) включают, когда относительная влажность воздуха превышает 75…80 %.

При неблагоприятных погодных условиях вентилирование прекращают, однако при повышении температуры штабеля сохнущей травы выше 40 °С проводят его охлаждения путем вентилирования в течение 1 часа. В среднем, для охлаждения сохнущей травы в дождливую погоду вентиляторы включают через каждые 5 часов на 1 час работы. Общая продолжительность сушки этим методом составляет 100…200 часов работы САВ.

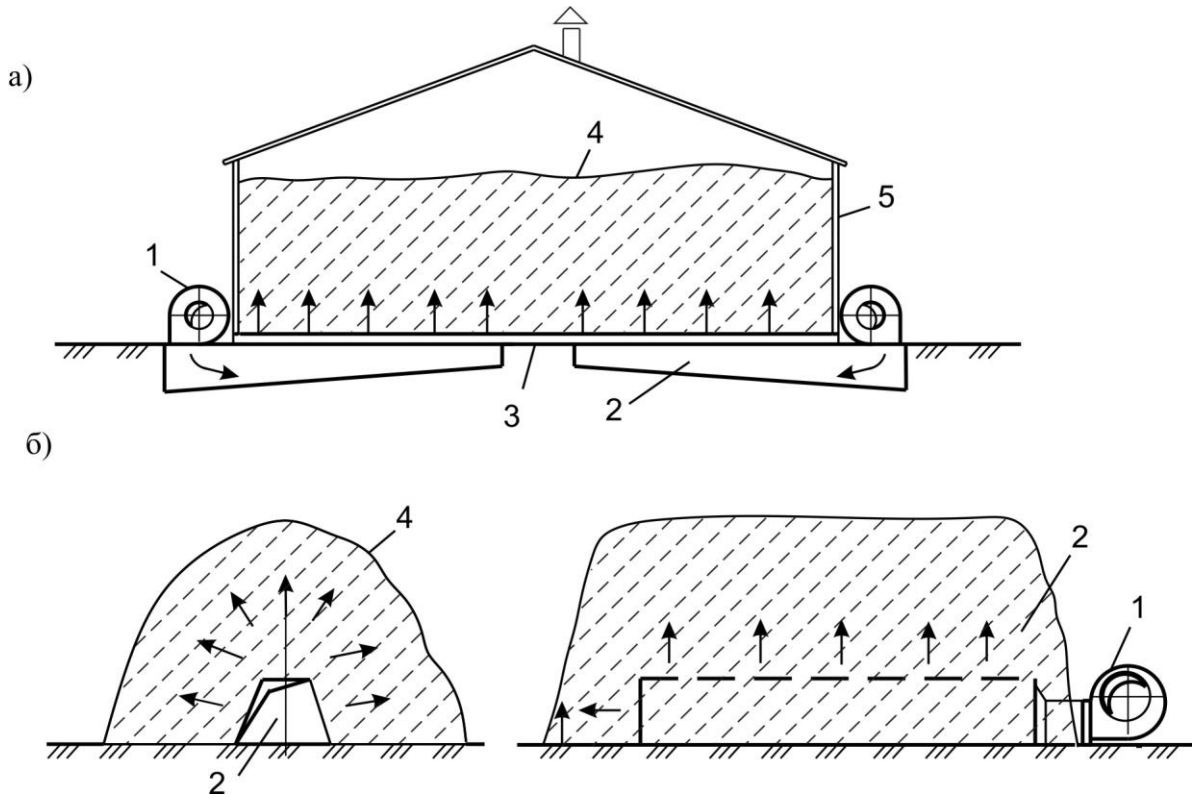


Рисунок 1.8 – Схемы систем активной вентиляции для сушки травы: 1 - вентилятор; 2 – воздухораспределительный канал; 3 – решетчатый пол; 4 – штабель сохнущей травы; 5 – хранилище

Свежеубранное зерно имеет влажность от 20 до 35 % и не подлежит длительному хранению. Поэтому зерно сразу после уборки подвергают сушке. Наиболее распространенным способом сушки зерна является конвективный, при котором теплота к зерну подводится от неподогретого или подогретого (в калориферах) воздуха, либо от смеси топочных газов с воздухом.

Различают высокотемпературную и низкотемпературную сушку. Высокотемпературная сушка зерна осуществляется в шахтных (прямоточных и рециркуляционных) и барабанных зерносушилках теплоносителем температурой от 50 до 400 °С. Затраты теплоты на сушку в этом случае составляют 6400…8800 кДж/кг испаренной влаги [255].

В тех случаях, когда обработка зерна и семян в сушилках затруднена или невозможна, применяют активное вентилирование зерновой насыпи низкотемпературным теплоносителем в камерных сушилках, бункерах и специально оборудованных складах. Данная технология послеуборочной обработки получила широкое распространение для сушки семян, содержащих большое количество белковых веществ (зернобобовые культуры) или мягкую оболочку (кукуруза, горох),

что позволяет избежать денатурации белка и травмирования зерна. Активное вентилирование также применяют для сушки ячменя, пшеницы, семян подсолнечника и других культур. Мягкие режимы сушки позволяют рекомендовать этот метод для послеуборочного дозревания семенного и селекционного зерна и хранения высоковлажного (17…19 %) кормового зерна [178, 241, 331].

В установках активного вентилирования летом и ранней осенью в качестве агента сушки используют атмосферный воздух $t_н$ = 15…25 °С. При таких параметрах теплоносителя и сравнительно малых удельных расходах воздуха сушка протекает достаточно медленно. Для ускорения процесса съема влаги и снижения относительной влажности рабочего воздуха в неблагоприятную погоду его подогревают до температуры 35…50 °С [7, 196, 241, 245, 284, 314]. Энергоемкость технологии повышается до 2400…2900 кДж/(кг исп. вл.) при искусственном подогреве воздуха и до 1520…2400 кДж/(кг исп. вл.) на привод вентиляторов при использовании неподогретого атмосферного воздуха [255]. Подогрев воздуха до 30 °С ускоряет досушку клеверно-тимофеечной травы в 2 раза, до 40 °С – в 2,7 раза, до 54 °С – почти в 3 раза по сравнению с вентилированием неподогретым воздухом [16]. Продолжительность сушки сортовых семян кукурузы в камерных зерносушилках воздухом с температурой 35…50 °С при высоте насыпи 2…4 м в зависимости от первоначальной влажности зерна может составлять от 20 до 120 ч. Из-за более низкой скважистости вентилирование семян пшеница, ячменя, подсолнечника и других культур проводят в течение 3,5…30 ч., ограничивая высоту насыпи в пределах 0,5…0,85 м, температура агента сушки – 33…60 °С [7, 105].

Однако повышение температуры продувочного воздуха влечет за собой неравномерность процесса сушки: пересушка слоев на входе воздуха в насыпь и возможность выпадения конденсата на выходе. Равномерность просушивания слоя достигается за счет реверсивных режимов (периодическое изменение направления) продувки, увеличения подачи воздуха и снижения высоты насыпи.

Искусственный подогрев приточного воздуха, как правило, осуществляют в электрокалориферах и воздухоподогревателях, работающих на жидком или газообразном топливе. В малых фермерских хозяйствах теплогенераторы работают

автономно, в крупных агрокомплексах – как элемент системы теплообеспечения [107, 151, 152].

Рациональная в практических условиях величина подогрева продувочного воздуха в зависимости от параметров атмосферного воздуха и влажности травы может быть определена по графику на рисунке 1.9. Значения удельных расходов воздуха, рекомендуемые различными авторами, приведены в таблице 1.1.

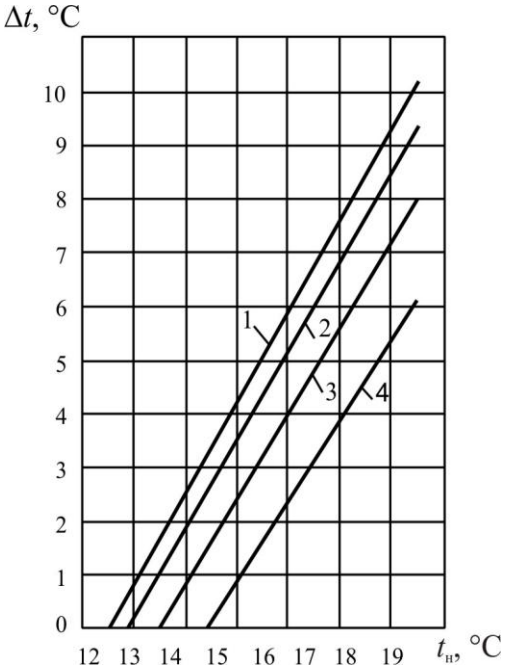


Рисунок 1.9 – Зависимость величины подогрева продувочного воздуха Δ*t* от температуры окружающей среды $t_н$ [227]: 1 – начальная влажность провяленной травы $w_{тр}$ = 35 %; 2 – $w_{тр}$ = 45 %; 3 – $w_{тр}$ = 55 %; 4 – $w_{тр}$ = 65 %

Однако следует отметить, что многочисленные данные о величине рациональной степени перегрева и удельных расходов воздуха в САВ не поддаются обобщению, т.к. в большинстве случаев определяются исходя из многолетнего опыта и зависят от климатических условий района, технических характеристик установок и т.п. Это является следствием отсутствия конкретной и обоснованной теплофизической модели процессов тепломассобмена в слое биологически активного сырья и инженерной методики расчета и технико-экономического обоснования режимов работы энергоэффективных установок сушки.

Несмотря на то, что искусственный подогрев атмосферного воздуха требует дополнительных затрат, этот способ интенсификации процесса сушки биологически активного сырья широко применяется и при достаточном энергетическом и

Таблица 1.1 – Удельные расходы воздуха при сушке травы активным вентилированием

Страна	L, м^3/(м^2·ч)	L_m,м^3/(т·ч)	Примечание	Источник
Рассыпное сено				
Россия	300 216 430 640 600…700	1200 110[1] 220[1] 330[1] –	– $w_{тр}$ < 35 % $w_{тр}$ = 35...45 % $w_{тр}$ = 45...60 % измельч. трава	[16] [145] [145] [167] [13]
Англия		840...3360		[209]
Германия	216…324	–	–	[333]
	–	800...1000	$w_{тр}$ = 30 %	[337]
	–	1500...1900	$w_{тр}$ = 40 %	
	– – –	2500...3100 1250...1550[2] 2300...2900[2]	$w_{тр}$ = 50 % $w_{тр}$ = 40 % $w_{тр}$ = 50 %	
	–	1000...1250[3]	$w_{тр}$ = 40 %	
	–	2100...2600[3]	$w_{тр}$ = 50 %	
	400...500	–	–	[219]
	600...800	–	измельч. трава	
Голландия	–	840…1680	–	[209]
Прессованное сено				
Россия	900…1000	–	–	[16, 106, 145]
	800	–	сухая зона	[106]
	1200	–	влажн. зона	
Англия	820	–	–	
Швеция	1500	–	–	[327]
Германия	600…1000	–	–	[219]
Кукуруза в початках				
Россия	–	200	$w_з$ < 25 %	[178]
	–	400	$w_з$ = 25 %	[241]
	–	500	$w_з$ = 30 %	
	–	700	$w_з$ = 35 %	
	–	900	$w_з$ > 35 %	
Семена клещевины				
Россия	–	400	$w_з$ = 15 %	[241]
	–	600	$w_з$ = 20 %	
	–	1000	$w_з$ = 25 %	

1 – размерность м^3/(м^3·ч); 2 – подогрев воздуха на 2,5 °С; 3 – то же, на 5 °С

экономическом обосновании может считаться более предпочтительным в процессах кормопроизводства и хранения зерна.

Выбор способа поддержания параметров микроклимата при хранении сочного растительного сырья зависит от объемов хранящейся продукции.

Хранение небольших партий осуществляется в погребах и подпольях, которые, как правило, являются частью индивидуального жилого дома. Тепловой режим в данных сооружениях зависит от температурного состояния окружающего грунта, параметры которого близки к оптимальным для сохранности продукции. Обеспечение требуемого воздухообмена осуществляется системами естественной вентиляции. Влажностный режим носит саморегулируемый характер, относительная влажность стремится к 100 %, т.е. близка к равновесной.

Массовое хранение СРС осуществляется в стационарных хранилищах и в полевых сооружениях. В автономных полевых сооружениях (бурты и траншеи) в России храниться 40…50 % [233], в Германии 50…75 % [321].

Массовое использование буртов в полевых условиях в автономном режиме эксплуатации ограничено в связи с отсутствием систематизированных данных по динамике микроклимата. Одним из основных недостатков буртов с естественными системами вентиляции является нерегулируемый теплообмен с наружным воздухом и сложность удаления влаги из насыпи продукции. Также ограниченное применение буртов связано с большими затратами теплоизоляционных материалов, недостаточным воздухообменом ($L_m < 4$ м^3/(т·ч)) и большими затратами ручного труда [233].

Для поддержания стабильных температурных и влажностных параметров микроклимата в объеме бурта в течение всего периода хранения применяют системы активного вентилирования. Подача воздуха в слой хранящейся продукции осуществляется через напольные устройства, выполненные в виде треугольных в поперечном сечении, щелевидных коробов. Принципиальная схема постоянной буртовой площадки показана на рисунке 1.10.

Хранение крупных партий сочного растительного сырья осуществляется в стационарных хранилищах.

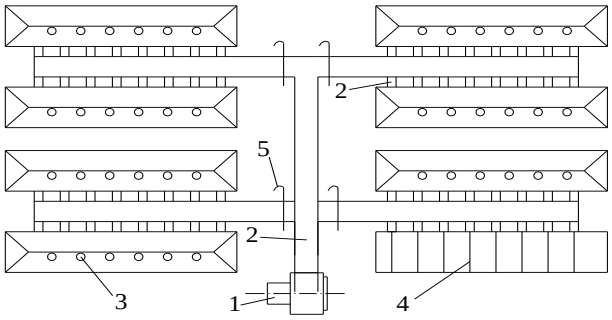


Рисунок 1.10 – Бурт с системой активной вентиляции [297]: 1 – вентустановка; 2 – приточный воздуховод; 3 – вытяжной воздуховод; 4 – канал подачи воздуха в насыпь; 5 – регулирующее устройство

Как правило, они проектируются и возводятся одноэтажными, прямоугольной формы, с пролетами одинаковой высоты и ширины, иногда с чердаками. Фрагмент плана картофелехранилища показан на рисунке 1.11.

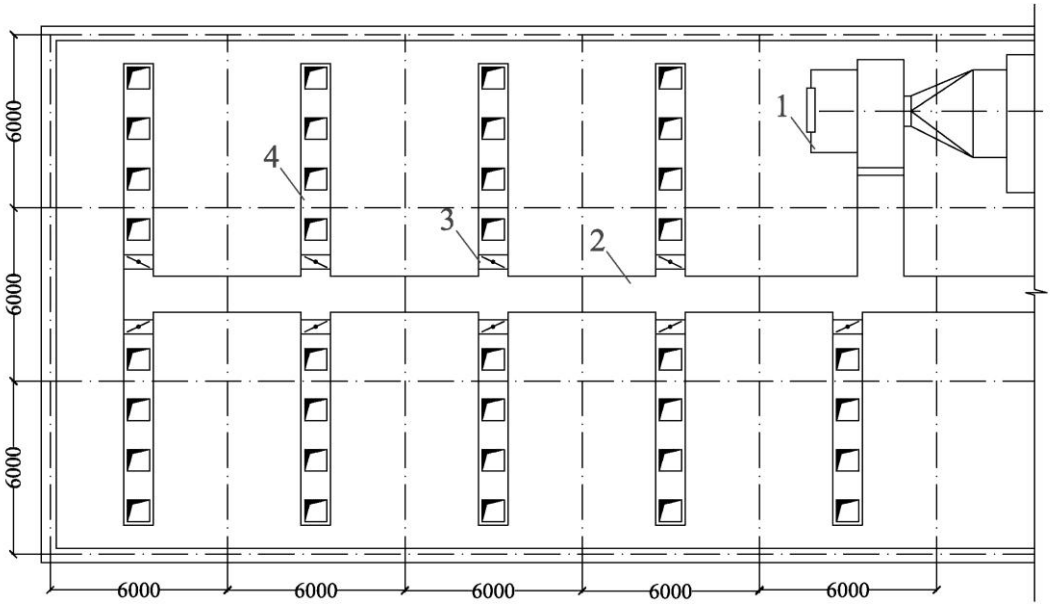


Рисунок 1.11 – Стационарное хранилище [35]: 1 – вентилятор; 2 – магистральный канал; 3 – шибер; 4 – распределительный канал

В стационарных хранилищах предусматривается естественная, общеобменная механическая или активная вентиляция [63, 65].

Интенсивность воздухообмена в насыпи при естественной вентиляции продукции (рисунок 1.12, а) зависит от величины располагаемого давления $\Delta p_{е} = gh(\rho_{н} - \rho_{в})$, Па. Установка деревянных решетчатых коробов поперечным сечением 0,2 х 0,2 м на расстоянии не более 2,5…3,0 м позволяет увеличить воздухообмен. Однако, в целом, применение системы естественной вентиляции в овоще- и картофелехранилищах имеет ряд существенных недостатков: повышение

температуры в насыпи; недостаточный воздухообмен; невозможность регулирования процессов тепломассообмена между продуваемым воздухом и продукцией. Таким образом, использование систем естественной вентиляции для поддержания требуемых технологических параметров при хранении сочного растительного сырья не может рассматриваться как перспективное. Такой способ хранения допустим при высоте насыпи картофеля и столовой свеклы 0,8…1,0 м, насыпи моркови – до 0,6 м, насыпи кочанов капусты – до 0,5 м.

Системы общеобменной механической вентиляции (рисунок 1.12, б), как правило, применяются в хранилищах, где хранение сочного растительного сырья осуществляется в контейнерах. Интенсивность вентилирования L, м^3/ч, массы продукции в период охлаждения согласно ОНТП-6-86 [211] принимается вне зависимости от степени загруженности хранилищ равной $n_{об}$ = 8…12 обмен./ч. В период основного хранения (зимой) величину $n_{об}$ следует снижать на 50 %:

$$L = n_{об} V , \qquad (1.26)$$

где V – объем помещения хранения продукции, м^3.

При больших объемах навального хранения продукции наибольшее распространение получила система активной вентиляции (рисунок 1.12, в). Данная система хорошо поддается автоматическому регулированию, но в то же время имеет большие потери давления в магистральных и раздающих каналах.

Коэффициент полезного использования объема хранилища зависит от способа хранения продукции и типа системы вентиляции. Например, для картофеля при размещении в закромах (естественная вентиляция) коэффициент полезного использования объема составляет 0,14…0,2 т/м^3, в контейнерах (механическая общеобменная вентиляция) 0,17…0,25 т/м^3, при размещении клубней навалом (активная вентиляция) 0,33…0,4 т/м^3.

Важную роль для сохранности продукции играет направление подачи воздуха в насыпь. При схеме вентиляции «снизу вверх» воздух из распределительных каналов поступает в насыпь продукции через решетчатые полы, специальные напольные раздающие короба или подпольные каналы с решетчатыми покрытиями.

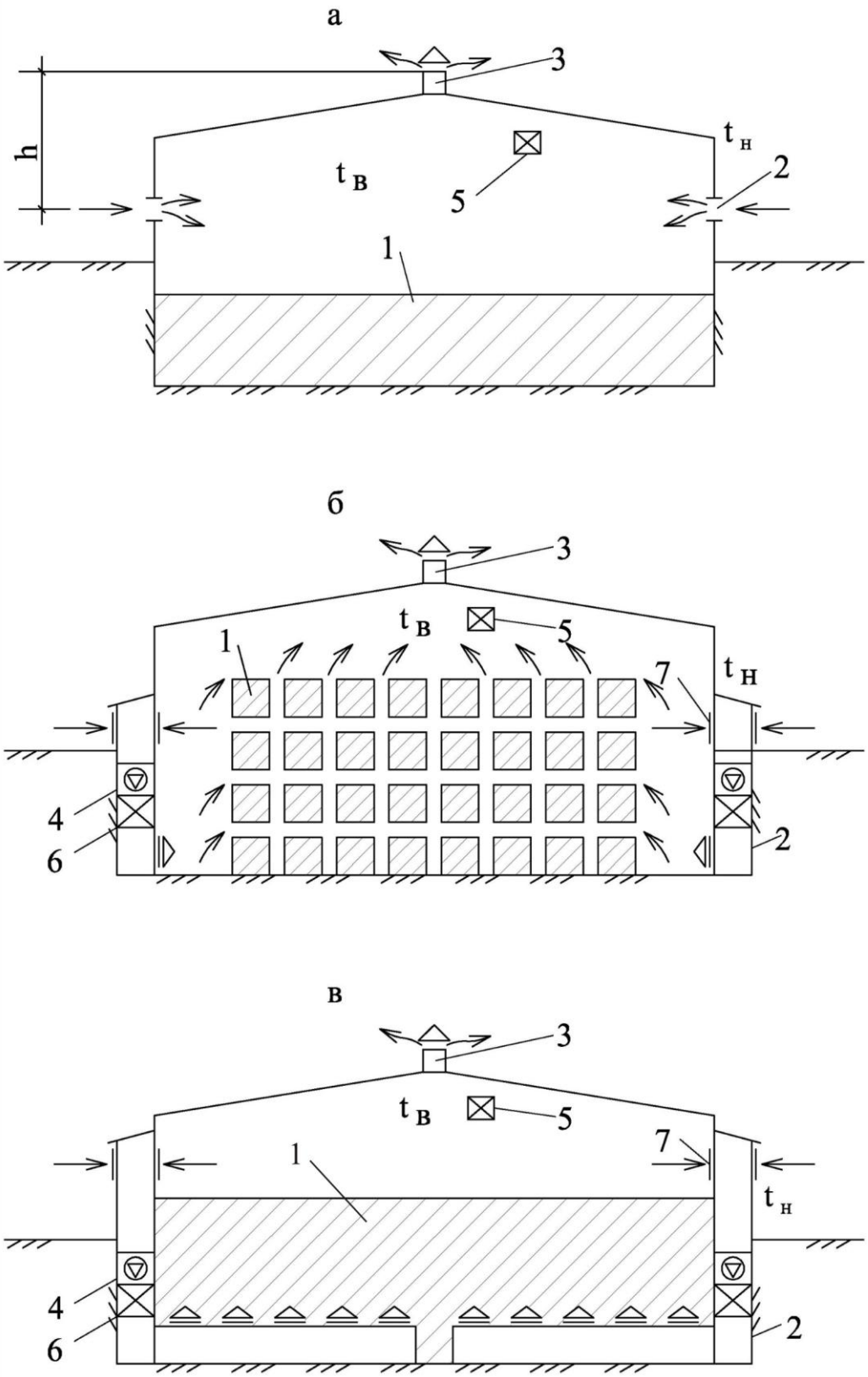


Рисунок 1.12 – Принципиальная схема устройства вентиляции в хранилище: естественная (а), общеобменая (б), активная (в) [35]: 1 – сырье; 2, 3, 7 – приточные, вытяжные и рециркуляционные воздуховоды, соответственно; 4 – вентилятор 5 – воздушно-отопительный агрегат; 6 – оборудование для обработки воздуха.

Скорость воздуха на выходе из канала в насыпь картофеля и овощей не должна превышать 1,0 м/с.

В случае подачи воздуха по схеме «сверху вниз», как правило, устанавливаются реверсивные системы активной вентиляции (РСАВ), в которых происходит поочередная смена продувок по схемам «сверху вниз» и «снизу вверх» насыпей СРС. Продувка «снизу вверх». В период охлаждения происходит прямоточная (без рециркуляции) подача наружного воздуха в насыпь с расходом $L_{об}$, который полностью удаляется в атмосферу через вытяжную шахту.

В основной период хранения приготовление приточного воздуха осуществляется путем смешивания минимально необходимого количества наружноговоздуха $L_н$ с рециркуляционным $L_р = (L_{об} - L_н)$, забираемым из хранилища по рециркуляционному воздуховоду.

Продувка «сверху вниз». В период охлаждения в насыпь поступает только наружный воздух в количестве $L_{об}$. Атмосферный воздух забирается через вытяжную шахту, проходит через насыпь, по воздуховодам – байпасам и удаляется в атмосферу. Основной период хранения характеризуется смешиванием наружного $L_н$ и рециркуляционного $L_р$ воздуха перед поступлением его в насыпь в свободной от продукции верхней части объема хранилища.

В период охлаждения режимы работы САВ нормируются биологически оптимальным темпом охлаждения насыпи $\Delta z_{опт}$ = 0,02…0,04 °С/ч. Время работы САВ в течение суток характеризуется коэффициентом использования вентиляции: $К_в = \Delta\tau_в/24$, где $\Delta\tau_в$ – время работы систем вентиляции в сутки, ч. [35].

$$К_в = 2\,\frac{1+0{,}25\eta_{эф}}{1+1{,}5L_{эф}}, \qquad (1.27)$$

где $\eta_{эф} = 10^4\ \Delta z_{опт}/q_{СРС}$, м^3 °С/кДж, – коэффициент эффективности охлаждения, учитывающий отношение оптимальной скорости охлаждения к объему внутренних тепловыделений, интервал численных значений равен 1…7;

$L_{эф} = L_v\ \Delta T_0/q_{СРС}$, м^3°С/кДж, – приведенный к мощности тепловыделений и начальным температурным условиям ($\Delta T_0 = t_{к.о} - t_{в.о}$) расход воздуха.

Оптимальные значения приведенного расхода на 1 кубический метр насыпи СРС, м^3/(м^{3}ч), лежат в пределах:

$$L_{v\ \text{опт}} \geq (3{,}8\ q_{\text{СРС}} + 1{,}1 \cdot 10^4 \Delta z_{\text{опт}})\ / \Delta T_0. \qquad (1.28)$$

Величина $L_{v\ \text{опт}}$ должна быть ограничена при высоте насыпи от 3,0 до 6,0 м значением $L_{v\ \text{опт}} < 717/h = 120\ldots240$ м^3/(м^{3}ч).

Целью работы систем активной вентиляции в *основной период хранения* является обеспечение оптимальной температуры продукции и относительной влажности воздуха в межклубневом пространстве.

Необходимый расход воздуха при непрерывной вентиляции определяется условием $\Delta T_0 = 2$ °С и равен $L_{v\ \text{непр}} = 0{,}4\ q_{\text{СРС}}$.

Цикличная работа вентиляции предусматривает периодическое охлаждение. При выключенной вентиляции темп разогрева максимален в верхних слоях насыпи. Естественная конвекция, охлаждая нижние слои, приводит к неизбежной стратификации температуры по высоте. Предпочтительными являются оптимальные режимы, соответствующие средним значениям К$_{\text{в}}$ [42]:

$$\begin{aligned} К'_{\text{в опт}} &= (0{,}27\ldots0{,}4)\ \frac{q_{\text{СРС}}}{L_v} = 0{,}33\frac{q_{\text{СРС}}}{L_v};\ t_{\text{во}} > t'_{\text{хр}}; \\ К''_{\text{в опт}} &= (0{,}45\ldots0{,}65)\ \frac{q_{\text{СРС}}}{L_v} = 0{,}55\ \frac{q_{\text{СРС}}}{L_v};\ t_{\text{во}} < t'_{\text{хр}}. \end{aligned} \qquad (1.29)$$

Приведенные зависимости позволяют определить общее время работы вентиляции для снятия теплоизбытков. Нахождение цикличности работы САВ в течение суток связано с вопросами обеспечения влажностного режима насыпи. В процессе вентиляции пониженная влажность подаваемого воздуха увеличивает естественную убыль.

Коррекция режимов работы картофелехранилищ, в основной период хранения, при отличных от оптимальных условий хранения ($t'_{\text{хр}} \neq 1{,}5$ °С) может быть проведена по зависимостям [35]:

$$К'_{\text{в}} = 0{,}8\frac{q_{\text{СРС}}}{(4 - t'_{\text{хр}})L_v} - 3{,}4\ \frac{2 - 0{,}5t'_{\text{хр}}}{L_v h},\ \text{при}\ t'_{\text{хр}} \leq 3\ °\text{С}; \qquad (1.30)$$

$$К''_{в} = 1{,}3\frac{q_{СРС}}{\Delta T_{о} L_{v}}, \text{ при } t'_{хр} > 3\ °С. \qquad (1.31)$$

В действующих картофелехранилищах системы активной вентиляции подают в насыпь расход воздуха (L_v). Зная его конкретную величину, находят значения $К_в$ и время работы систем вентиляции в сутки для основного периода и периода охлаждения. Найденное время может быть не равно оптимальному, но будет достаточным для обеспечения температурного режима рассматриваемой насыпи в оба периода хранения.

Длительное непрерывное вентилирование (более 4…6 ч.) нарушает равновесную влажность не только в корректирующем слое, но и по всей высоте насыпи. Возможное некоторое увеличение нормируемой естественной убыли в этом случае компенсируется уменьшением влияния неблагоприятных последствий, вызванных нарушением технологических температурных параметров в насыпи.

В период охлаждения нет оснований для появления зон конденсации во всех слоях насыпи СРС [35].

Следует отметить, что в технической литературе недостаточно данных по одновременной автоматизации температурных и влажностных параметров воздушной среды овощекартофелехранилищ.

Таким образом, в настоящее время наиболее перспективным направлением является хранение крупных партий продукции в контейнерах или навалом в стационарных хранилищах или буртах с активной вентиляцией. Повышение сохранности продукции при использовании указанных методов хранения возможно за счет правильного выбора типа вентиляции, определении режимов хранения, учитывающих текущие тепловлажностные характеристики хранящейся продукции.

Системы обеспечения параметров микроклимата в подземных сооружениях

Температурный, влажностный и воздушный режимы подземных сооружений отличаются от условий поддержания микроклимата в надземных гражданских и производственных зданиях. Это обусловлено наличием интенсивного влагообмена между воздухом помещения и ограждающими конструкциями, примы-

кающими к грунту, нестационарностью теплового потока во времени и отсутствием инфильтрации воздуха через ограждения.

Подземные сооружения по характеру формирования параметров микроклимата могут быть разделены на следующие типы [267]:

Первый тип – это сооружения, в которых происходят значительные суточные и годовые колебания температур воздуха, связанные с колебаниями температуры атмосферного воздуха, используемого для их вентиляции. К этому типу сооружений относятся транспортные тоннели, подземные пешеходные переходы и аналогичные сооружения.

Второй тип – это сооружения с различными режимами работы, в которых периодически могут возникать ситуации, требующие при заданном тепловом потоке определения возможного времени достижения какой-либо промежуточной температуры, являющейся для данного этапа конечной. К таким сооружениям могут относиться отдельные производства.

Третий тип – это сооружения, в которых не происходят значительные колебания внутренних температур воздуха, и задан необходимый минимальный воздухообмен. К этому типу сооружений относятся подземные гаражи, склады, магазины и т.п.

Эксплуатация современных подземных пешеходных переходов в связи с расширением их функционального назначения может осуществляться с учетом всех перечисленных видов теплообмена.

Инженерные методы расчета систем вентиляции метрполитенов, автомобильных и железнодорожных тоннелей, шахт мелкого заложения и других подземных сооружений достаточно разработаны и широко представлены в нормативной и справочной литературе [72, 80, 90, 94, 183, 198, 223, 234, 253, 259, 277, 289, 339].

Системы вентиляции должны обеспечивать эксплуатацию железнодорожного или автодорожного тоннеля в нескольких режимах [259]:

Режим А – нормальный – когда осуществляется безостановочное движение транспорта с максимальной разрешенной скоростью при интенсивности, соответствующей часу «пик»;

Режим Б – замедленный – в ситуациях, когда осуществляется безостановочное движение транспорта со скоростью менее 20 км/ч;

Режим В – транспортная пробка – в случаях, когда происходит остановка транспорта с работающими двигателями на время длительностью до 15 мин.

Применение вентиляции в тоннелях обусловлено необходимостью снижения до допустимой концентрации вредных газов, устранения задымления и запыленности воздуха, создания нормального температурного режима.

Выбор между естественным проветриванием и искусственной вентиляцией тоннеля решается в зависимости от ряда факторов и в первую очередь от длины тоннеля и рода применяемой тяги и транспортных единиц.

Естественное проветривание допускается в железнодорожных тоннелях длиной до 300 м при тепловозной тяге и до 1000 м при электрической тяге, а также в автодорожных тоннелях длиной до 150 м.

При большей длине тоннеля необходимость искусственной вентиляции устанавливают в зависимости от рода тяги, продольного профиля и плана тоннеля и подходов к нему, расположения тоннеля по отношению к направлению господствующих ветров и частоты движения поездов или автомашин. При этом в железнодорожных тоннелях длиной более 1000 м при тепловозной тяге и в автодорожных тоннелях длиной более 400 м искусственная вентиляция обязательна независимо от установленной расчетом возможности естественной вентиляции [277].

Для вентилирования тоннелей применяют продольную, поперечную или комбинированную системы вентиляции. При продольной системе воздух подается и удаляется по всему сечению тоннеля вентиляторами, установленными у порталов (рисунок 1.13, а). Эффективность продольной вентиляции в значительной степени зависит от направления и силы естественной тяги, а также от поршневого эффекта подвижного состава [277]. Такую систему наиболее целесообразно применять в автодорожных тоннелях с односторонним движением транспорта длиной не более 1 км, а также в железнодорожных тоннелях. Продольная вентиляция может осуществляться и по схеме с вентиляционными шахтами (рисунок 1.13, б). В

тоннелях длиной до 1,5…2 км находит применение продольно-струйная система вентиляции (1.13, в).

Для тоннелей, имеющих значительную протяженность и большую интенсивность движения, используют поперечную систему вентиляции. Подача и удаление воздуха осуществляется по продольным каналам, движение воздуха осуществляется перпендикулярно оси тоннеля. Применение поперечной вентиляции ограничено в связи с необходимостью увеличения сечения тоннеля для размещения вентиляционных каналов. К достоинствам поперечной вентиляции относятся: быстрое удаление вредных газов из сечения тоннеля, поступление свежего воздуха по всей длине тоннеля, отсутствие движения воздуха в тоннеле с большими скоростями и опасности распространения огня вдоль тоннеля при пожаре, независимость вентиляции от силы естественной тяги и движения подвижного состава.

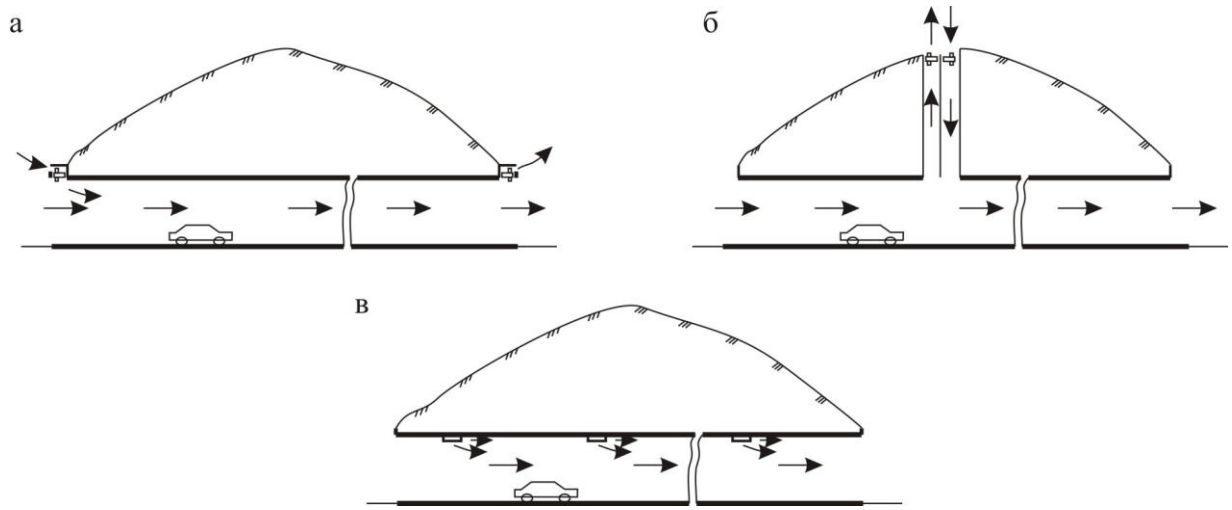


Рисунок 1.13 – Продольная система вентиляции тоннеля

На линиях метрополитенов применяют, как правило, вентиляцию с искусственным побуждением. Тоннельную вентиляцию предусматривают для пассажирских помещений подземных и наземных закрытых станций, пересадочных коридоров между станциями, перегонных и тупиковых тоннелей, тоннелей соединительных веток, а также наземных закрытых участков линий [258]. В теплый период воздух забирается с поверхности через станционные шахты и удаляется через тоннельные шахты (рисунок 1.14 б). Это позволяет поддерживать относительно невысокую температуру на станциях. В холодный период, наоборот, воздух подается с поверхности через тоннельные шахты, подогревается за счет тепловыделе-

ний от электропоездов, оборудования и пассажиров и удаляется через станционные шахты (рисунок 1.14 а) [124].

Для закрытых наземных участков линии допускается принимать естественную вентиляцию за счет использования поршневого действия поездов. Возможность использования естественной вентиляции в режиме дымоудаления определяют расчетом [258].

Условия естественного проветривания и влияние поршневого эффекта на вентилирование тоннелей подземных сооружений рассмотрены в п. 1.3.5.

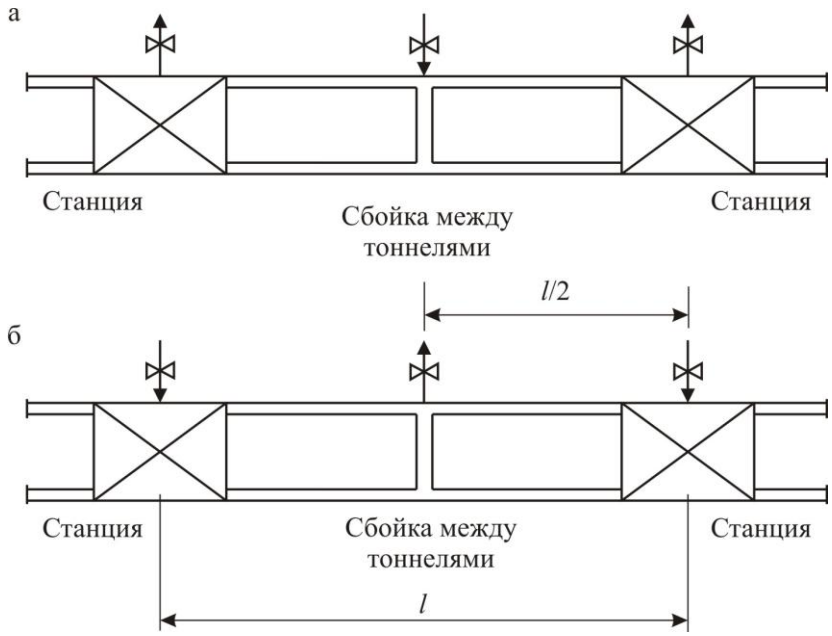


Рисунок 1.14 – Схема вентиляции метрополитена: а – зимний режим; б – летний режим

Следует отметить, что ни в отечественной, ни в зарубежной технической, нормативной и справочной литературе нами не обнаружено решения задач по формированию параметров микроклимата и воздушного режима, а также проектирования систем обеспечения микроклимата в подземных пешеходных переходах. Для проектирования естественной вентиляции подземных пешеходных переходов под автомобильными дорогами в настоящее время отсутствует научно обоснованная теория по определению движущих сил переноса воздуха, а также результаты лабораторных и натурных экспериментов по обеспечению требуемого воздухообмена.

Необходимо аналитически и графически определить границы использования систем естественной вентиляции в подземных пешеходных переходах: по

воздухообмену, по температуре, относительной влажности воздуха. Требуют разработки проектные предложения, как для типовых, так и для индивидуальных переходов.

1.2. Базовые основы аэродинамики систем обеспечения микроклимата

1.2.1. Теория смешивания потоков профессора П.Н. Каменева

Основы аэродинамики при смешивании потоков заложены профессором П.Н. Каменевым [127, 128, 130, 131, 132]. Разработанный метод перемещения единицы объема позволяет получить общее уравнение движения жидкости (воздуха) в трубопроводе (воздуховоде).

Вывод основного уравнения движения потока основан на допущении, что по сборному каналу перемещается единица объема воздуха в единицу времени 1 м^3/с (рисунок 1.13). Тогда потери давления на сборном участке будут равны:

$$\Delta p = R \cdot l, \tag{1.32}$$

где R – удельное сопротивление, Па/м; l – приведенная длина воздуховода, м.

При разделении потока в тройнике по одному из ответвлений перемещается объем β_1 м^3/с, соответственно, по второму $(1 - \beta_1)$ м^3/с.

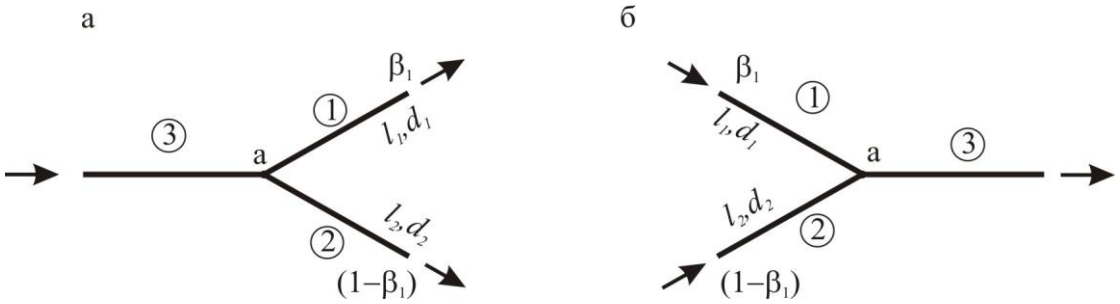


Рисунок 1.15 – К выводу уравнения движения воздуха: а – разделение потоков; б – слияние потоков

Потери давления в ответвлениях пропорциональны квадрату скорости (квадрату объема), т.е. $\Delta p_1 = R_1 \cdot l_1 \cdot \beta_1^2$; $\Delta p_2 = R_2 \cdot l_2 \cdot (1 - \beta_1^2)$. Принимая за основу равенство статических давлений в начале смешивания (деления) потоков, получим:

$$\Delta p = R_1 \cdot l_1 \cdot \beta_1^2 = R_2 \cdot l_2 \cdot (1-\beta_1^2); \qquad (1.33)$$

$$\frac{R_1 \cdot l_1}{R_2 \cdot l_2} = \left(\frac{1-\beta_1}{\beta_1}\right)^2 = C. \qquad (1.34)$$

Величину β_1 можно определить, решив уравнение (1.34) в виде [132]:

$$C \cdot \beta_1^2 = 1 - 2\beta_1 + \beta_1^2;$$

$$\beta_1 = \frac{1 \pm \sqrt{C}}{1-C} = \frac{1 \pm \sqrt{C}}{(1+\sqrt{C}) \cdot (1-\sqrt{C})};$$

$$\beta_1 = \frac{1}{1+\sqrt{C}}, \ \beta_1^{'} = \frac{1}{1-\sqrt{C}}. \qquad (1.35)$$

Графическое изображение решения уравнения (1.34) представлено на рисунке 1.16. Положительные корни уравнения (1.34) изображаются кривой *bc*, касающейся оси *y* на расстоянии равном 1,0 и уходят в бесконечность, приближаясь к оси *x*. Откладывая по оси *x* значения *C*, по ординате от оси *x* до кривой *bc* определяется величина расхода в первом участке β_1, м^3/с. Ордината от кривой *bc* до линии *bf*, проведенной параллельно оси *x* на расстоянии, равном единице, дает значения расходов во втором участке $(1 - \beta_1)$, м^3/с.

Если первый участок закрыт, его сопротивление равно бесконечности ($C = \infty$), то значение $\beta_1 \to 0$, т.е. весь расход пойдет по второму участку. В случае, когда $C = 0$, сопротивление второго участка равно бесконечности, весь расход пойдет по первому участку ($\beta_1 = 1$ м^3/с). При равенстве потерь давления на первом и втором участках $C = 1{,}0$ общий расход будет распределен по обоим участкам в равных долях, т.е. $\beta_1 = 0{,}5$ м^3/с и $(1 - \beta_1) = 0{,}5$ м^3/с. Для случая эжекции (рис.1.15, б) действителен второй корень уравнения (1.34). Расход в первом участке в этом случае изображается кривой *de*, стремящейся в бесконечности оси *x* и уходящей в минус бесконечность, касаясь асимптотически линии *km*, параллельной оси *y* и отстоящей от этой оси на расстоянии равном +1,0. Величина расхода воздуха в первом участке β_1 меняется от нуля до минус бесконечности и соответствует объему отсасываемого эжектором воздуха на единицу объема воздуха, проходящего по первому участку.

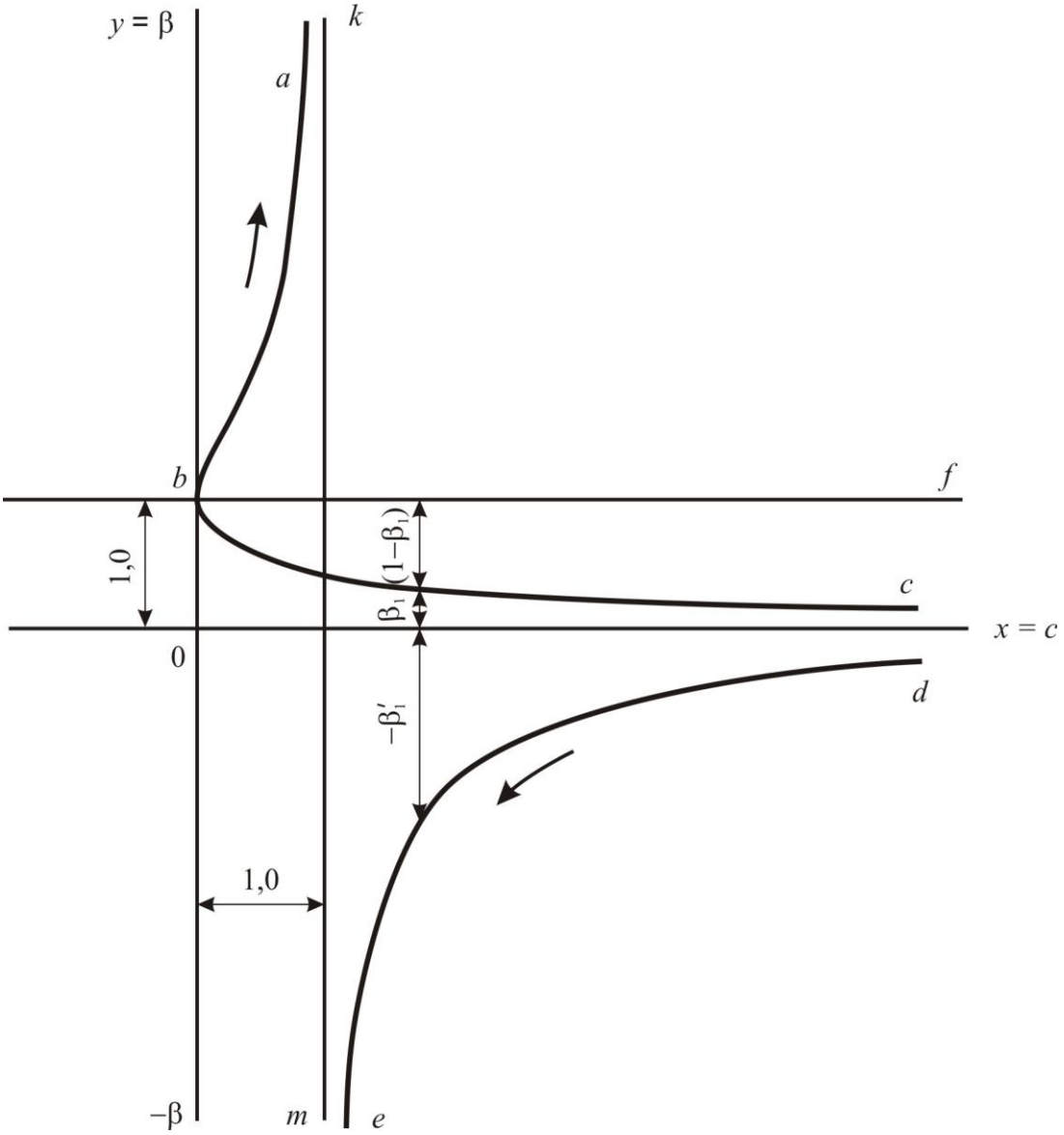


Рисунок 1.16 – Графическое изображение решения уравнения движения воздуха в разветвленном воздуховоде

Расход во втором участке характеризуется кривой *ab*, стремящейся к линии параллельной оси *y* и отстоящей от этой оси на расстоянии равном +1,0.

Профессором П.Н. Каменевым определены условия возникновения эжекции в отверстии воздуховода при идеальном диффузоре ($\zeta = 0$) и при наличии внезапного расширения [132].

Отсутствие движения воздуха в отверстие *1* при нагнетании воздуха из воздуховода диаметром d_1 при идеальном диффузоре (рисунок 1.16, б) будет наблюдаться при длине второго участка:

$$l_2 = \frac{d_2}{\lambda_2}\left[\left(\frac{d_2}{d_1}\right)^4 - 1\right]. \qquad (1.36)$$

где λ_2 – коэффициент трения 2-ого участка.

Всасывание в отверстие 1 (явление эжекции) происходит при длине второго участка меньше значения l_2, определяемого уравнением (1.36) (рисунок 1.17, а). Соответственно, нагнетание воздуха в отверстие *1* будет происходить при длине второго участка больше l_2 (рисунок 1.17, в)

При наличии внезапного расширения (рисунок 1.18) критическая длина второго участка l_2 равна:

$$l_2 = 2\frac{d_2}{\lambda_2}\left[\left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2 - 1\right]. \qquad (1.37)$$

Таким образом, корни уравнения (1.34) характеризуют связь между аэродинамическими сопротивлениями участков, сходящихся в одной точке при всасывании или нагнетании, как при нормальной работе (положительные корни), так и при эжекции (отрицательные корни).

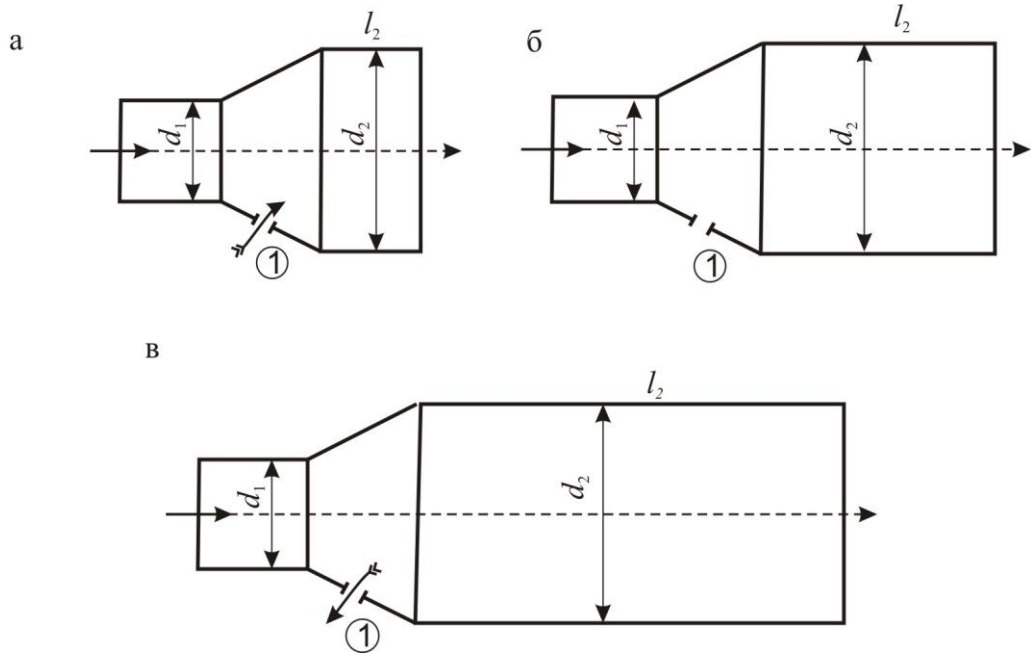


Рисунок 1.17 – Условия смешивания потоков при условии идеального диффузора (без потерь): а – всасывание (эжекция); б – отсутствие всасывания и нагнетания; в – нагнетание

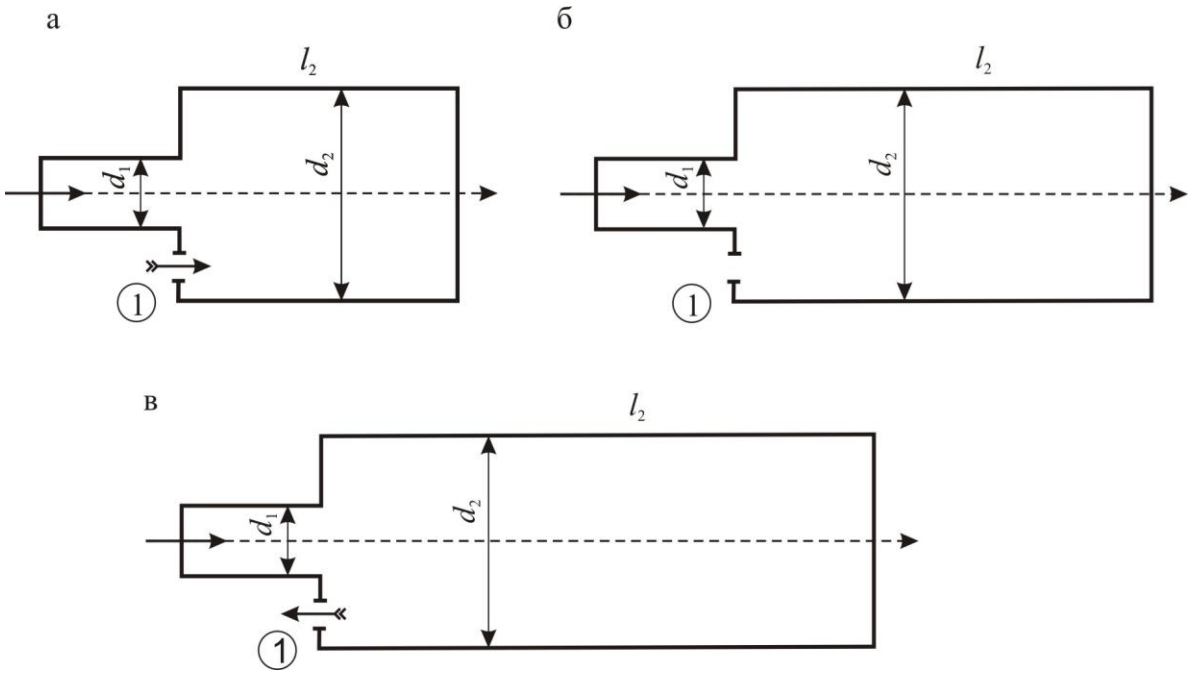


Рисунок 1.18 – Условия смешивания потоков при наличии внезапного расширения: а – всасывание (эжекция); б – отсутствие всасывания; в – нагнетание.

Теория профессора П.Н. Каменева дает физическую картину динамики аэродинамических процессов при слиянии и делении потоков. Она является основой для получения аналитических количественных характеристик и будет использована при анализе аэродинамических показателей систем естественной и механической вентиляции.

1.2.2. Коэффициенты местных сопротивлений в тройниках

Потери давления при смешивании двух потоков определяются при известных значениях диаметров, скоростей и расходов на всех трех участках тройника и угле α между осью магистрали и ответвлением (рисунок 1.19).

Основным положением теории смешивания потоков является следующее утверждение [126]: «если изменять диаметр d_3 основного участка, то может быть найден такой диаметр воздуховода после слияния потоков d'_3 и соответствующая ему скорость v'_3, при которых потери при смешивании потоков будут минимальными».

В зависимости от действительной скорости v_3 возможны три случая смешивания: $v_3 = v_3$; $v'_3 > v_3$; $v'_3 < v_3$ [126].

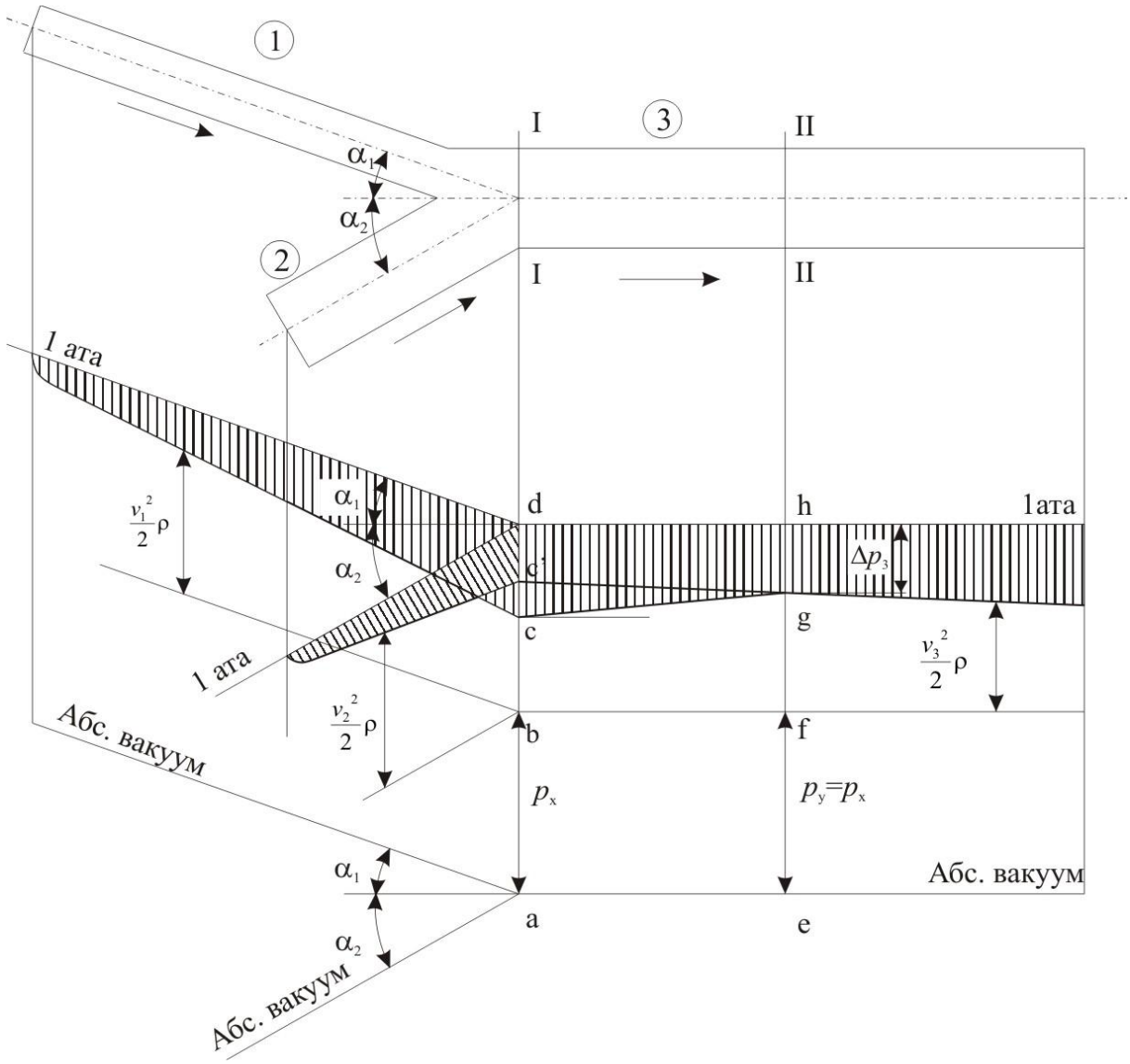


Рисунок 1.19 – Смешивание потоков; $v_3' = v_3$ [132]

1. Скорость после смешивания потоков равна скорости на основном участке ($v'_3 = v_3$).

Наивыгоднейшая скорость смешивания потоков v'_3 определяется из условия постоянства статического давления на всем протяжении участка смешивания:

$$v_3' = v_{\text{наив}} = \frac{L_1}{L_3} v_1 \cos\alpha_1 + \frac{L_2}{L_3} v_2 \cos\alpha_2 , \qquad (1.38)$$

где L_1 и L_2 – расходы воздуха в ответвлениях *1* и *2*; v_1 и v_2 – скорости воздуха в ответвлениях *1* и *2*; α_1 и α_2 – угол между осью участка *3* и ответвлением *1* и *2* соответственно (рисунок 1.19).

Коэффициент местного сопротивления определяется путем приравнивания произведения ζ первого участка на динамическое давление по третьему участку к

разности между полным абсолютным давлением в первом участке до смешивания потоков (сечение I - I, рисунок 1.19) и полным абсолютным давлением после смешивания (сечение II – II):

$$\left(p_x + \frac{v_1^2}{2}\rho\right) - \left(p_x + \frac{(v_3')^2}{2}\rho\right) = \zeta_1' \frac{(v_3')^2}{2}\rho. \qquad (1.39)$$

Отсюда

$$\zeta_1' = \left(\frac{v_1}{v_3'}\right)^2 - 1. \qquad (1.40)$$

Аналогично для *2* участка:

$$\zeta_2' = \left(\frac{v_2}{v_3'}\right)^2 - 1. \qquad (1.41)$$

2. Скорость после смешивания потоков больше скорости в основном участке ($v'_3 > v_3$). Смешение потоков в данном случае происходит в два этапа: смешение при постоянном статическом давлении, т.е. при наивыгоднейшей скорости смешивания v'_3; внезапное расширение сечения воздуховода с f'_3 до f_3, что приводит к падению скорости смешанного потока v'_3 до v_3. Таким образом, имеют место дополнительные потери давления при внезапном расширении. Дополнительный коэффициент местного сопротивления вследствие внезапного расширения потока определяется из условия:

$$\Delta p = \frac{(v_3' - v_3)^2}{2}\rho = \zeta_{\text{доп}} \frac{v_3^2}{2}\rho, \text{ т.е. } \zeta_{\text{доп}} = \left(\frac{v_3'}{v_3} - 1\right)^2. \qquad (1.42)$$

Общие коэффициенты местных сопротивлений равны:

$$\zeta_1 = \zeta_1' + \zeta_{\text{доп}}; \ \zeta_2 = \zeta_2' + \zeta_{\text{доп}} \qquad (1.43)$$

где ζ'_1 и ζ'_2 определяются по формулам (1.40) и (1.41).

3. Скорость после смешивания потоков меньше скорости в основном участке ($v'_3 < v_3$). Аналогично предыдущему случаю процесс смешивания можно разделить на два процесса: смешение при наивыгоднейшей скорости смешивания v'_3; внезапное сужение сечения воздуховода с f'_3 до f_3, что приводит к повышению скорости смешанного потока v'_3 до v_3.

Таким образом, поток после смешивания с минимальными потерями не вмещается в геометрической форме основного участка. Коэффициент местного сопротивления внезапного сужения можно определить по рисунку 1.20 в зависимости от отношения действительной площади основного участка f_3 к необходимой площади при минимальных потерях f'_3.

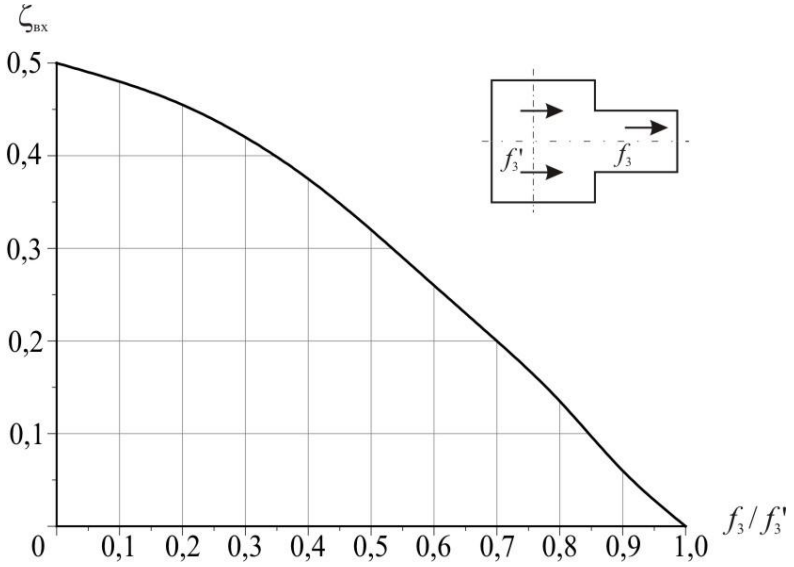


Рисунок 1.20 – Коэффициент местного сопротивления при внезапном сужении потока

Полный коэффициент местного сопротивления будет превышать соответствующую величину ζ'_1 и ζ'_2 на величину коэффициента местного сопротивления на вход $\zeta_{вх}$:

$$\zeta_1 = \zeta'_1 + \zeta_{вх}\,;\ \zeta_2 = \zeta'_2 + \zeta_{вх} \qquad (1.44)$$

Таким образом, коэффициенты местных сопротивлений могут иметь как положительное так и отрицательное значение. На рисунке 1.19 точка «*g*» лежит ниже точки «*c'*», т.е. для второго участка характерно положительное значение ζ_2 . В тоже время точка «*g*» находится выше точки «*c*», соответственно для первого участка характерно отрицательное значение ζ_1. Имеем, что при одном и том же значении L_2 / L_3, если один из коэффициентов отрицателен, то другой положителен. Это обусловлено тем, что до смешивания оба потока имеют одинаковую величину вакуума и различные полные абсолютные давления. При смешивании потоков происходит потеря их общей энергии, но при этом потоки обмениваются запасами полных удельных энергий. Изменение величин ζ_1 и ζ_2 происходит так,

что сумма кажущихся отрицательных потерь в одном ответвлении с избытком компенсируется положительной потерей в другом ответвлении.

Соотношение скоростей v'_3 / v_3 позволяет проанализировать наивыгоднейшие формы тройников при смешивании потоков.

Смешивание параллельных потоков [131]. При равенстве площадей сечения воздуховодов до и после смешивания $f_3 = f_1 + f_2$ (рисунок 1.21) потери давления в процессе смешивания параллельных потоков отсутствуют (давление остается постоянным) только в случае равенства массовых скоростей $v\rho$, кг/(м^{2}с), смешивающихся потоков: $v_1\rho_1 = v_2\rho_2$.

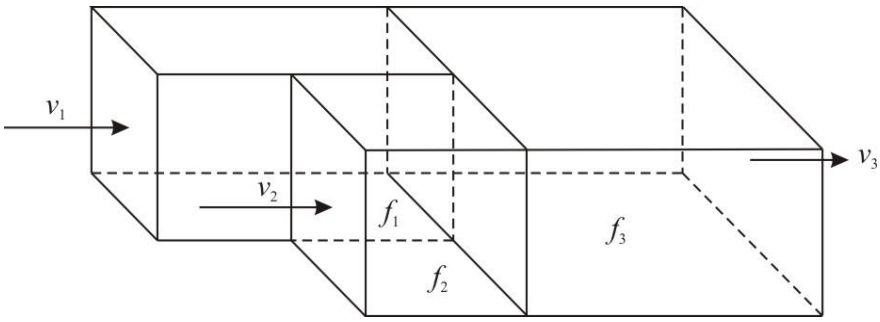


Рисунок 1.21 – Смешивание параллельных потоков

При одинаковых объемных плотностях смешивающихся потоков, но различных скоростях их течения постоянство давлений в процессе смешивания наблюдается только в случае, когда площадь сечения камеры смешения f_3 меньше общей площади сечения ($f_1 + f_2$) потоков до их смешивания, т.е. $(f_1 + f_2) - f_3 > 0$. Таким образом, при смешивании двух параллельных потоков с одинаковыми объемными плотностями, но различными скоростями минимальная потеря давления происходит при такой форме смесительной камеры, когда площадь в конце смешивания меньше площади в начале смешивания.

Смешивание непараллельных потоков. При одинаковых скоростях потоков в ответвлениях потери давления в тройниках будут минимальны при наименьшем угле между ответвлениями. Следовательно, необходимо устройство диффузоров на основном участке, когда $v'_3 > v_3$ (рисунок 1.22), и устройство конфузоров, когда $v'_3 < v_3$ (рисунок 1.23). Угол раскрытия диффузора (конфузора) рекомендуется принимать в пределах 12°.

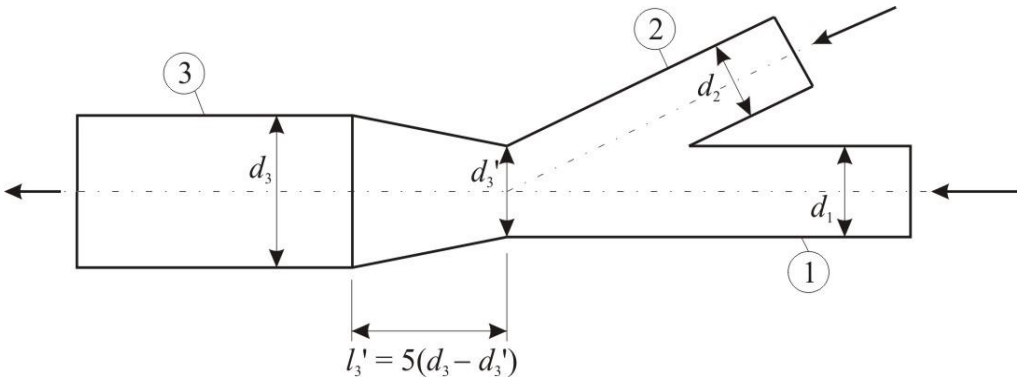


Рисунок 1.22 – Наивыгоднейшая форма тройника при $v_3' > v_3$

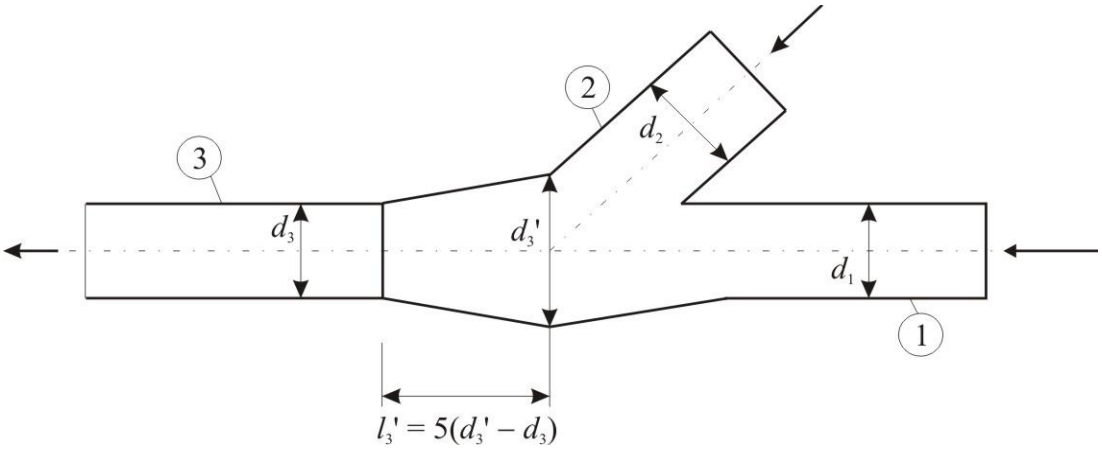


Рисунок 1.23 – Наивыгоднейшая форма тройника при $v_3' < v_3$

На практике наиболее часто встречаются тройники с углом между ответвлением и магистралью $\alpha = 90°$. Примем, что расходы и скорости потоков в магистрали и в ответвлении равны: $L_1 = L_2$, $v_1 = v_2 = v_3$ (рисунок 1.24). Для соблюдения наивыгоднейшей формы тройника диаметр основного участка равен:

$$d_3' = 1{,}41 d_3 . \qquad (1.45)$$

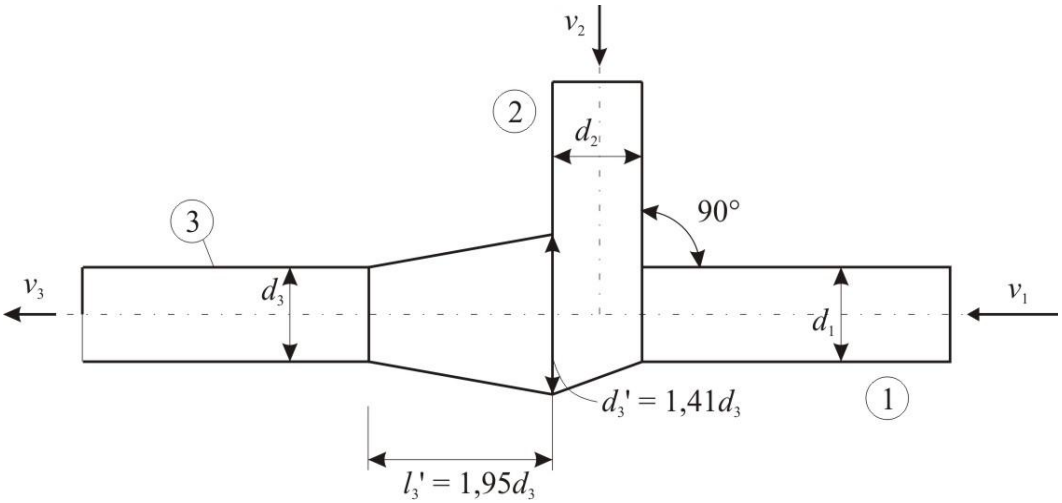


Рисунок 1.24 – Наивыгоднейшая форма тройника при $d_1 = d_2$; $L_1 = L_2$; $v_1 = v_2 = v_3$; $\alpha = 90$ °

Длина конического участка d'_3 с углом между его образующими α = 12°:

$$l'_3 = 1{,}95 d_3 \approx 2 d_3 . \qquad (1.46)$$

Зависимости (1.45) и (1.46) справедливы и для определения наивыгоднейшей формы штанообразных тройников.

Таким образом, минимизация потерь давления в тройниках возможна путем устройства суженного (при внезапном расширении) или расширенного (при сжатии) сечения, при котором поток после смешивания будет точно вмещаться в геометрической форме тройника.

1.3. Аэродинамика естественной вентиляции и аэрации

1.3.1. Аэродинамические коэффициенты здания

Набегающий на здание поток воздуха образует зоны циркуляции с наветренной и заветренной сторон здания. В зоне аэродинамического следа на наветренной стороне статическое давление выше, чем в невозмущенном потоке. На заветренной стороне здания статическое давление в циркуляционной зоне меньше, чем в невозмущенном потоке (рисунок 1.25). Наиболее полно изучено обтекание модели отдельно стоящего здания в установившемся воздушном потоке аэродинамической трубы (рисунок 1.26) [126]. На наветренной стороне здания в местах сопряжения плоской или покатой кровли с наружной стеной также формируются локальные зоны разрежения, что фиксировалось при экспериментальных исследованиях аэродинамических характеристик блочных и трехзвенных теплиц в аэродинамической трубе при различных углах обдува [35].

Для фиксации ветрового давления на вертикальную поверхность здания p_v применяются аэродинамические коэффициенты c_v, равные отношению избыточного статического давления к динамическому давлению потока воздуха:

$$p_{\text{ст}} = p_v = c_v \frac{v_{\text{ветр}}^2}{2} \rho . \qquad (1.47)$$

Для здания, имеющего форму параллелепипеда, фасад которого расположен перпендикулярно направлению ветра, аэродинамические коэффициенты в центре фасада $c_{v\text{н}}$ = 0,4…0,8, на фасаде с заветренной стороны $c_{v\text{з}}$ = –0,3…–0,6. Ближе к

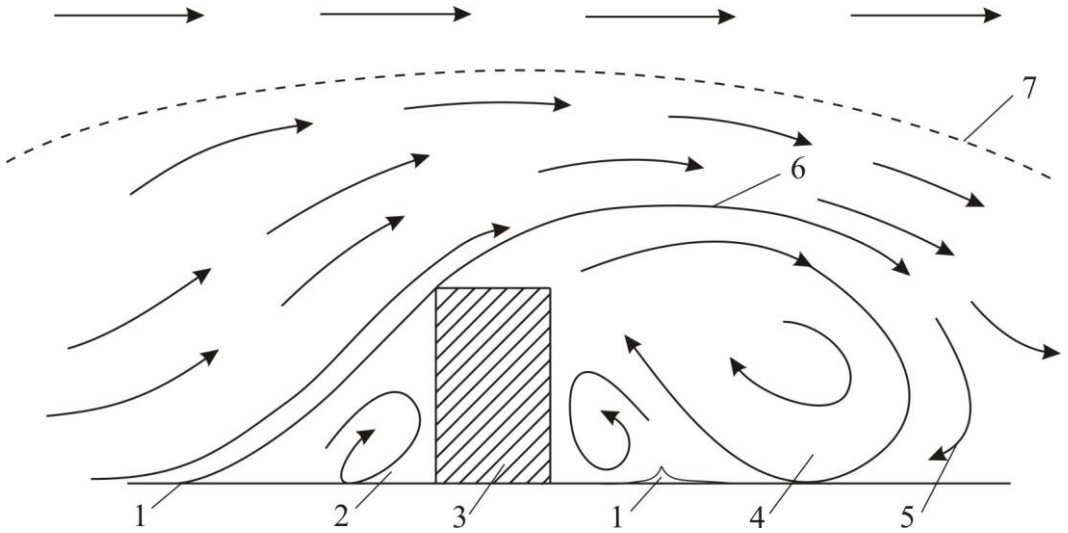


Рисунок 1.25 – Схема обтекания здания потоком воздуха: 1 – граница между вихрями в зоне аэродинамического следа, участок с нулевой скоростью движения воздуха; 2 – зона избыточного давления; 3 – здание; 4 – зона разрежения и вихревого движения воздуха; 5 – обратные потоки воздуха, входящие в зону аэродинамического следа; 6 – граница зоны аэродинамического следа; 7 – граница влияния здания на поток воздуха [126]

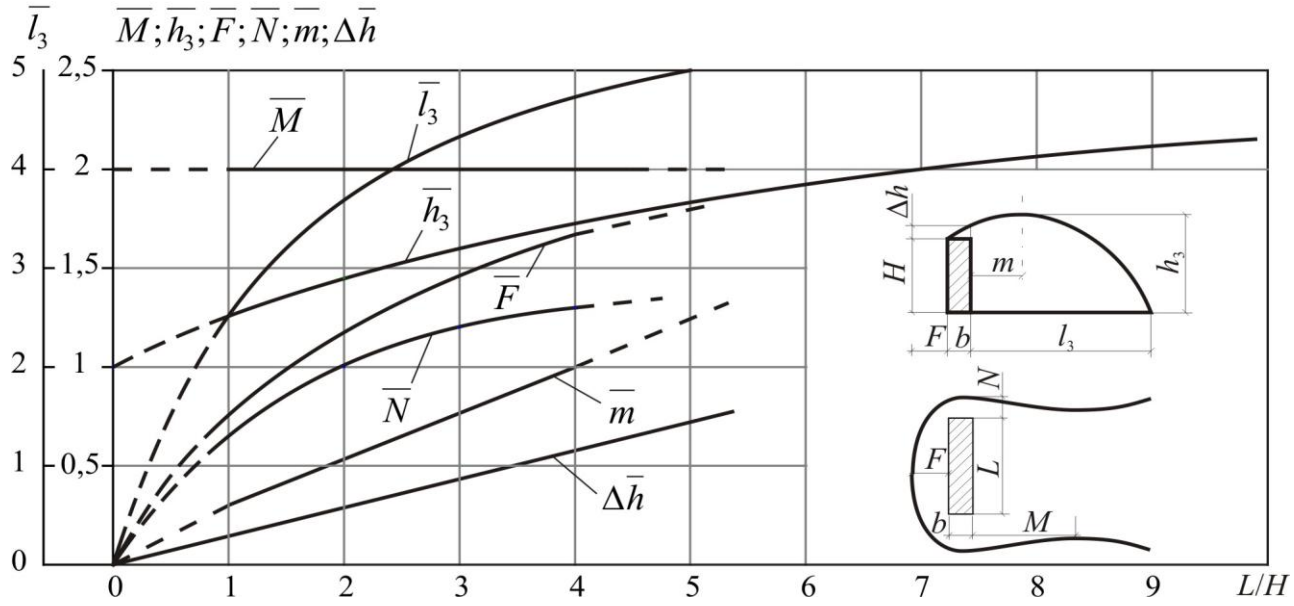


Рисунок 1.26 – Зависимость размеров зоны аэродинамического следа от габаритных размеров здания (данные применимы для $b/H < 0{,}5$) [126]

краям фасада величины $c_{v\text{н}}$ и $c_{v\text{з}}$ уменьшаются из-за отклонения направления ветра от первоначального.

Важный вывод получен Э.И. Реттером [231], что коэффициенты c_v, полученные для сплошных моделей, равны коэффициентам таких же моделей с открытыми проемами.

Выявлено непостоянство значений скорости ветра по высоте. В первом при-

ближении это распределение оценивается по уравнению Г. Шлихтинга [299]:

$$v_{\text{ветр}} / v_{\text{ветр}}^{\infty} = (h / h_{\infty})^{1,7}, \qquad (1.48)$$

где $v_{\text{ветр}}$ – скорость ветра на произвольном расстоянии h от поверхности земли; $v_{\text{ветр}}^{\infty}$ – скорость на достаточно большом расстоянии h_{∞}, где она становиться практически постоянной.

В строительных нормах скорость ветра дается на высоте h = 10 м. При расчетной скорости ветра $v_{\text{ветр}}^{\infty}$ = 5,0 м/с на высоте, например, 3,0 м она на 25% ниже (≈ 3,8 м/с). В [126] приводятся следующие рекомендации. Если соотношение высоты здания H и протяженности l меньше 1 (низкое протяженное здание), обтекание воздухом происходит в основном над зданием, и в качестве расчетной принимается средняя скорость ветра по высоте здания. Для высоких зданий при $H / l > 1$ обтекание происходит с боков, изменение скорости ветра с высотой должно учитываться и расчетной является скорость ветра на уровне рассматриваемой точки поверхности ограждения.

Эпюра давлений в помещении здания, формируемая только действием ветра, приведена на рисунке 1.27.

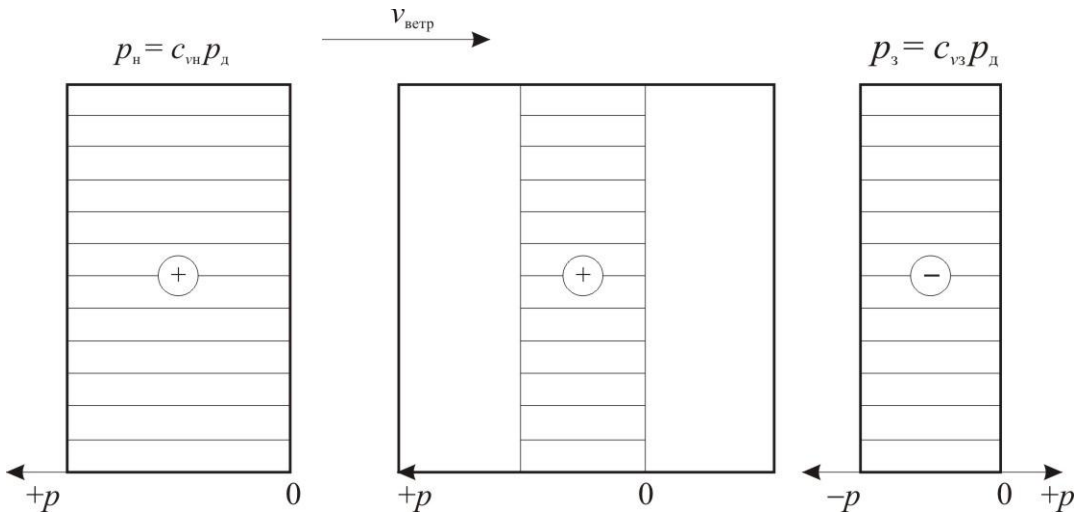


Рисунок 1.27 – Эпюра ветрового давления

Условно принята постоянная скорость ветра по высоте. Полная величина ветрового давления составляет:

$$p_v = (c_{v\text{н}} - c_{v\text{з}}) \frac{v_{\text{ветр}}^2}{2} \rho . \qquad (1.49)$$

Количественное определение полного давления с наветренной $p_н$ и заветренной $p_з$ сторон здания по аэродинамическим коэффициентам $c_{vн}$ и $c_{vз}$ необходимо проводить по средней скорости и повторяемости направления ветра за январь месяц, приводимых в [252]. За расчетную принимается наибольшая алгебраическая разность аэродинамических коэффициентов ($c_{vн} - c_{vз}$).

1.3.2. Аэрация

Процессы обмена помещений здания с атмосферным воздухом, перемещение воздуха из одного помещения в другое через пористую структуру и неплотности ограждений, по каналам и воздуховодам приточно-вытяжных систем под действием гравитационного и ветрового давлений объединяются общим понятием – воздушный режим здания.

Одним из видов создания воздушного режима здания через специальные аэрационные проемы под действием естественных побудителей воздуха (ветрового и гравитационного давлений) является аэрация. Преимущество аэрации по сравнению с механической вентиляцией заключается в перемещении больших объемов воздуха за счет естественных источников энергии.

Современные методики построения эпюр давления и расчетов величин давлений вытяжных систем при совместном действии гравитационного и ветрового давлений. Определяющим критерием выбора расчетного давления является соотношение между значениями ветрового p_v и гравитационного p_t давлений [126].

Аэрацию рассчитывают на действие только гравитационных сил (помещения со значительными тепловыделениями), если

$$p_v \le 0{,}5 H \Delta\rho g\,, \qquad (1.50)$$

где H – расстояние по вертикали между центрами приточных и вытяжных аэрационных отверстий, м; $\Delta\rho$ – разность плотностей наружного и внутреннего воздуха, кг/м^3.

Аэрацию рассчитывают на действие только ветра (помещения без тепловыделений или с незначительными теплоизбытками), если

$$p_v \ge 10 H \Delta\rho g\,. \qquad (1.51)$$

Аэрация рассчитывается на совместное действие гравитационных сил и ветра (жилые и общественные здания, значительное количество промышленных помещений), если

$$0{,}5H\Delta\rho g < p_v < 10H\Delta\rho g\,. \qquad (1.52)$$

Основные закономерности при расчете аэрации при совместном действии гравитации и ветра для однопролетных зданий при заданных воздухообменах по притоку $G_{пр}$ и по вытяжке $G_{выт}$, коэффициентах расходов $\mu_{пр}$ и $\mu_{выт}$ и плотностях наружного $\rho_н$ и внутреннего $\rho_в$ воздуха имеют следующий вид.

Массовый расход воздуха $G_{пр}$ через приточный аэрационный проем:

$$G_{пр} = 3600\mu_{пр}F_{пр}\sqrt{2\Delta p_{пр}\rho_н}\,, \qquad (1.53)$$

где $F_{пр}$ – площадь аэрационного проема, м^2; $\Delta p_{пр}$ – часть расчетного естественного давления аэрации, расходуемого на приток воздуха, Па.

Массовый расход воздуха $G_{выт}$ через вытяжной аэрационный проем:

$$G_{выт} = 3600\mu_{выт}F_{выт}\sqrt{2\Delta p_{выт}\rho_в}\,. \qquad (1.54)$$

Величины $\Delta p_{пр}$ и $\Delta p_{выт}$ соответственно, равны [114]:

$$\Delta p_{пр} = \frac{A_1}{1+A_1}\Delta p_{расч};\ \Delta p_{выт} = \Delta p_{расч} - \Delta p_{пр}\,, \qquad (1.55)$$

где $A_1 = \left(\dfrac{G_{пр}}{G_{выт}}\right)^2 \dfrac{\rho_в}{\rho_н}$.

Требуемые площади приточных и вытяжных отверстий определяются как

$$F_{пр} = G_{пр}/(3600\mu_{пр}\sqrt{2\Delta p_{пр}\rho_н})\,; \qquad (1.56)$$

$$F_{выт} = G_{выт}/(3600\mu_{выт}\sqrt{2\Delta p_{выт}\rho_в})\,. \qquad (1.57)$$

1.3.3. Аэродинамический расчет систем канальной естественной вентиляции

Аэродинамический расчет систем вентиляции проводят:

– с целью определения размеров сечений каналов/воздуховодов и потерь давления в них при известных значениях расходов воздуха (прямая задача);

– с целью определения расходов воздуха при известных значениях размеров сечений каналов/воздуховодов и давлении (обратная задача).

Условие работоспособности системы естественной вентиляции заключается в равенстве потерь давления в системе $\Delta p_{\text{сист}}$ и располагаемого давления $p_{\text{расп}}$. Допустимая невязка составляет 5…10 %:

$$\frac{p_{\text{расп}} - \Delta p_{\text{сист}}}{p_{\text{расп}}} 100 \le 10\,\%. \tag{1.58}$$

Располагаемое давление пропорционально разности плотностей наружного и внутреннего воздуха:

$$p_{\text{расп}} = gH(\rho_{\text{н}} - \rho_{\text{в}}), \tag{1.59}$$

где H – разность отметок центра вытяжной решетки и устья вытяжной шахты, м.

Расчетная температура наружного воздуха при расчете естественной вентиляции принимается равной +5 °С.

Потери давления в системе $\Delta p_{\text{сист}}$ равны сумме потерь давления на трение по длине каналов и потерь на местные сопротивления:

$$\Delta p_{\text{сист}} = (\lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta) \frac{v^2}{2} \rho\,. \tag{1.60}$$

Расчет потерь давления в системе, выполненной из типовых вентиляционных блоков, имеющих переменное сечение (рисунок 1.4), рекомендуется проводить по зависимостям [89]:

$$\Delta p = \varphi_{\partial} \cdot \frac{\rho \cdot \upsilon^2}{2}\,; \tag{1.61}$$

$$\varphi_{\partial} = \frac{\lambda}{d_{\text{г}}} \cdot l \cdot \left(\frac{F^p}{F}\right)^2 \cdot k_F + \Sigma\zeta \cdot \left(\frac{F^p}{F}\right)^2, \tag{1.62}$$

где F^p – площадь расчетного сечения участка, в котором измеряется скорость воздуха, м^2; F – площадь сечения ответвления или большего сечения сборного канала, м^2; k_F – коэффициент, вводимый для участков с плавным изменением сечения для прохода воздуха, определяется как отношение площадей большего сечения к меньшему.

Отношение $\lambda / d_{\text{г}}$ определяется по графику (рисунок 1.28) [89].

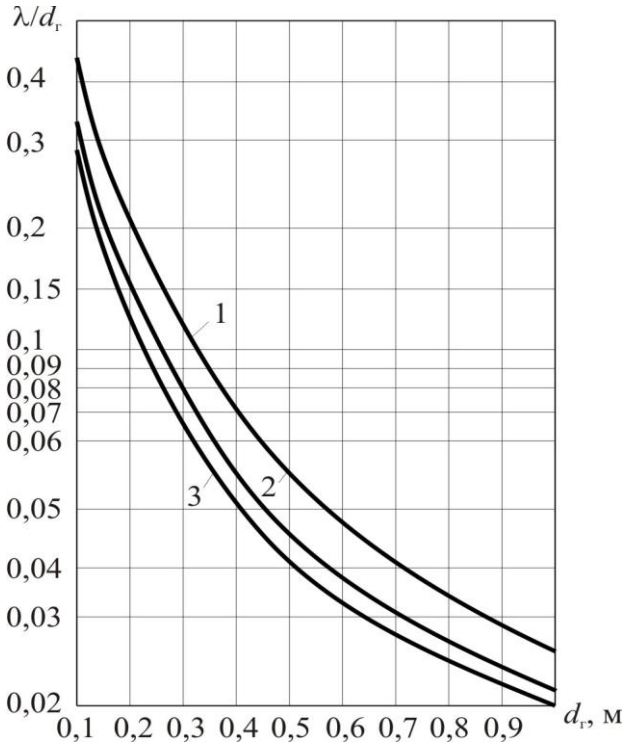


Рисунок 1.28 – График для определения отношения λ / $d_г$: 1 – для бетона; 2 – для асбестоцемента; 3 – для стали

Отметим, что при расчете вытяжной шахты значение λ / $d_г$, как правило, выпадает из области определения отношений, приведенной на рисунке 1.27. В результате определения числа Рейнольдса при объемах удаляемого через шахту воздуха от 3000 до 10000 м^3/ч получено, что режим движения воздуха при прохождении шахты турбулентный доквадратичный. При таком режиме коэффициент трения для шахты определяется по формуле А.Д. Альтшуля [22, 27]:

$$\lambda = 0{,}11\left(\frac{k_э}{d} + \frac{68}{\mathrm{Re}}\right)^{0{,}25}, \qquad (1.63)$$

где $k_э$ – эквивалентная абсолютная шероховатость, мм.

Зависимости потерь давления на местные сопротивления от геометрических размеров фасонных частей, расходов воздуха и режимов течения достаточно полно изучены И.Е. Идельчиком [109, 110, 111]. В частности, для тройников с малым углом присоединения ответвления коэффициенты местных сопротивлений для бокового ответвления и прямого прохождения следует определять по формулам [111]:

$$\zeta_{\text{с.б}} = 1 + \left(\frac{L_{\text{б}}}{L_{\text{с}}} \cdot \frac{F_{\text{с}}}{F_{\text{б}}}\right)^2 - 2\frac{F_{\text{с}}}{F_{\text{п}}} \cdot \left(1 - \frac{L_{\text{б}}}{L_{\text{с}}}\right)^2 - 2\frac{F_{\text{с}}}{F_{\text{б}}} \cdot \left(\frac{L_{\text{б}}}{L_{\text{с}}}\right)^2 \cos\alpha; \qquad (1.64)$$

$$\zeta_{\text{с.п}} = 1 + \left(\frac{F_{\text{с}}}{F_{\text{п}}}\right)^2 \left(1 - \frac{L_{\text{б}}}{L_{\text{с}}}\right)^2 - 2\frac{F_{\text{с}}}{F_{\text{п}}}\left(1 - \frac{L_{\text{б}}}{L_{\text{с}}}\right)^2 - 2\frac{F_{\text{с}}}{F_{\text{б}}} \cdot \left(\frac{L_{\text{б}}}{L_{\text{с}}}\right)^2 \cos\alpha, \qquad (1.65)$$

где $F_{\text{с}}$, $F_{\text{п}}$, $F_{\text{б}}$ – площади сечений вентиляционного канала, соответственно, большего и меньшего сечения сборного канала, бокового канала, м; $L_{\text{с}}$, $L_{\text{б}}$ – расходы воздуха, проходящего, соответственно, по сборному и боковому каналам, м^3/ч;
α – угол присоединения бокового ответвления тройника к сборному каналу.

Системы естественной вентиляции многоэтажных жилых зданий выполняются из унифицированных по высоте вентиляционных блоков. Расчет таких систем рекомендуется проводить по статическому давлению [276]. При этом способе расчета вместо определения потерь полного давления в тройнике вычисляют величину изменения статического давления при слиянии потоков. Поскольку размеры ответвлений и сборного канала по высоте здания остаются постоянными, а расходы воздуха во всех ответвлениях одинаковы, целью расчета в данном случае является определение дополнительных потерь давления на входе в канал этажа:

$$\Delta p = \left[\left(R \cdot \beta_{\text{ш}} \cdot \ell\right)_n + \left(\Sigma\zeta + 1\right)_n\right] \cdot p_{\text{д}.n} + p_{\text{ст}.n}, \qquad (1.66)$$

где $p_{\text{д}.n}$ – динамическое давление в ответвлении n-го этажа, Па; $p_{\text{ст}.n}$ – статическое давление в сборном канале в месте присоединения к нему ответвления с n-го этажа, Па, определяется последовательным расчетом, начиная с верхнего этажа:

$$p_{\text{ст}.n} = p_{\text{ст}.(n+1)} + (R \cdot \beta_{\text{ш}} \cdot \ell + Z)_{\text{к}.(n+1)} + \Delta p_{\text{ст}.n}. \qquad (1.67)$$

Статическое избыточное давление в сборном канале в месте присоединения верхнего ответвления составляет:

– при известном статическом давлении на срезе шахты:

$$\Delta p_{\text{ст}.N} = p_{\text{ст.к}} + \Delta p_{\text{ст.к}} + (R \cdot \beta_{\text{ш}} \cdot \ell)_{\text{к}.N} + Z_{\text{к}.N} + \Delta p_{\text{ст}.N}; \qquad (1.68)$$

– при известном полном давлении на срезе шахты:

$$\Delta p_{\text{ст}.N} = p_{\text{п.к}} + \Delta p_{\text{ст.к}} + (R \cdot \beta_{\text{ш}} \cdot \ell)_{\text{к}.N} + Z_{\text{к}.N} - p_{\text{д}.N} + \Delta p_{\text{ст}.N}, \qquad (1.69)$$

где $p_{\text{ст.к}}$ – изменение статического давления в канале при изменении его попереч-

ного сечения, Па; $(R \cdot \beta_{ш} \cdot \ell)_{к.N}$ – потеря давления в сборном канале от точки присоединения верхнего ответвления до верхнего среза, Па; $Z_{к.N}$ – потери давления в местных сопротивлениях расчетной части сборного канала, Па; $p_{д.N}$ – динамическое давление в сборном канале (в месте слияния потоков), Па; $\Delta p_{ст.N}$ – изменение статического давления в N-м тройнике, Па.

Необходимыми величинами для определения изменения статического давления в тройнике являются скорость воздуха в сборном канале выше тройника v_{3n}, до тройника v_{1n}, скорость воздуха в ответвлениях v_{2n} определяемые по формулам:

$$v_{1n} = L_{эт}(n-1)/F_{к} \quad (1.70)$$

$$v_{2n} = L_{эт}/F_{отв} \quad (1.71)$$

$$v_{3n} = L_{эт}n/F_{к} \quad (1.72)$$

где $F_{к}$, $F_{отв}$ – площади поперечного сечения соответственно сборного канала и ответвления, м^2; n – рассчитываемый этаж.

Методика по определению статических потерь давления основана на допущении, что расходы по отдельным ответвлениям одинаковы, тогда как по определению полных потерь давления возможен расчет на любые расходы воздуха. Поэтому для проведения дальнейших аэродинамических расчетов использован метод определения полных потерь давления, как дающий наиболее точные результаты потерь давления в тройниках естественных систем вентиляции.

1.3.4. Системы естественной горизонтальной вентиляции

Горизонтальная естественная вентиляция гражданских, промышленных и сельскохозяйственных помещений за счет ветрового давления осуществляется двумя способами: через специальные аэрационные или специальные щелевидные регулируемые по расходу воздуха или воздухопроницаемые проемы в продольных стенах помещений; за счет инфильтрации наружного воздуха через наружные стены. В последнем случае они становятся разновидностью систем вытесняющей приточно-вытяжной вентиляции.

Горизонтальная вентиляция через проемы в наружных стенах. Схема такой вентиляции приведена на рисунке 1.29. Она состоит из проемов, расположенных,

как правило, под окнами. Проемы могут быть заполнены каким-либо пористым материалом. Аэродинамический расчет таких систем изложен в [98]. При расчете систем центры вентиляционных проемов, расположенных на одном уровне,

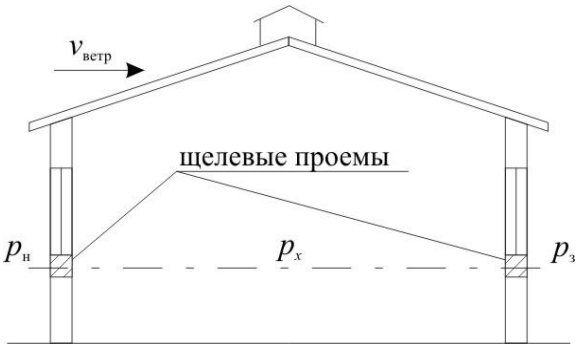


Рисунок 1.29 – Схема системы горизонтальной вентиляции

принимаются за плоскости начальных отсчетов. Полное наружное давление на навет ренной стороне здания равно $p_н = c_{vн}\, p_д$, на заветренной стороне $p_з = c_{vз}\, p_д$, внутреннее избыточное давление на этом уровне составляет p_x, где $p_д = v^2_{ветр}\rho_н / 2$ – динамическое давление ветра.

Из уравнения баланса воздуха после преобразований получим $\Delta p_н \rho_н = \Delta p_з \rho_в$, где $\Delta p_н = p_н - p_x$; $\Delta p_з = p_x - p_з$. Имеем уравнение баланса давлений: $\rho_н (c_{vн} p_д - p_x) = \rho_в (p_x - c_{vз} p_д)$, из которого определяем внутреннее избыточное давление на уровне центров вентиляционных проемов: $p_x = (\rho_н c_{vн} + \rho_в c_{vз}) p_д / (\rho_н + \rho_в)$. Зная p_x находим величины $\Delta p_н$ и $\Delta p_з$:

$$\Delta p_н = (c_{vн} - c_{vз}) p_д \rho_в / (\rho_н + \rho_в); \quad \Delta p_з = (c_{vн} - c_{vз}) p_д \rho_н / (\rho_н + \rho_в). \qquad (1.73)$$

Далее по зависимости (1.56) или (1.57) определяются площади проемов. Подставив в них значения $\Delta p_н$ или $\Delta p_з$ из (1.73), найдем площади проемов с наветренной или заветренной сторон при расходах воздуха $G_{пр}$ или $G_{выт}$, кг/ч:

$$F_н = F_з = G / (3600 \mu \rho_н v_{пр} (c_{vн} - c_{vз}) \sqrt{\frac{\rho_в}{\rho_в + \rho_н}}). \qquad (1.74)$$

Количество отверстий и площадь каждого из приточного с наветренной стороны и вытяжного отверстия с заветренной стороны здания находятся, исходя из общей их площади (1.74), в зависимости от объемно-планировочных решений зданий, их ориентации по сторонам света, окружающего ландшафта и т.д.

Системы гравитационной вентиляции. Простейшей системой гравитационной вентиляции является шахтная. Наружный воздух подается через подоконные или надоконные приточные щели, удаляется из верхней зоны через утепленные шахты (рисунок 1.30).

Расчетное гравитационное давление $\Delta p_t^{ш}$ определяется по формуле:

$$\Delta p_t^{ш} = (\rho_н - \rho_в) h_ш g \,. \qquad (1.75)$$

Плотность наружного воздуха $\rho_н$ принимается при температуре наружного воздуха, характерной для каждого класса рассматриваемых помещений (жилых, общественных, промышленных, сельскохозяйственных), но не ниже + 5 °С. Расчетная величина $h_ш$ равна разности высот устья шахты и центра приточной щели (на рисунке 1.30 показана высота от подоконной щели). В переходный период года при работе гравитационной вентиляции окна и ворота закрыты.

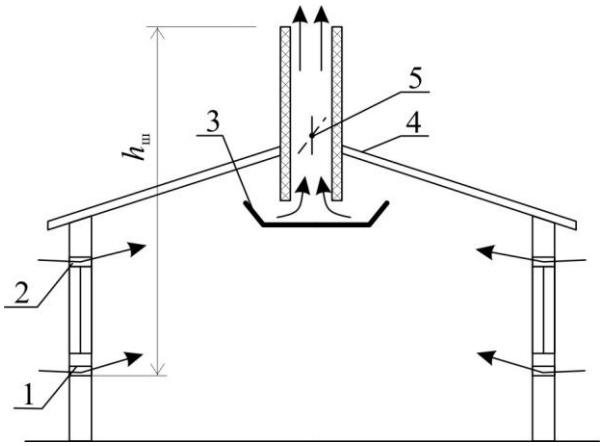


Рисунок 1.30 – Схема шахтной вентиляции: 1 – подоконный приточный проём; 2 – надоконный приточный проём; 3 – поддон; 4 – утеплённая шахта; 5 – дроссель клапан

При нахождении площади поперечного сечения $F_ш$ и устья отметки шахты $h_ш$ задаются по объемно-планировочным или технологическим соображениям одной из этих величин и находят другую.

1.3.5. Естественное проветривание подземных сооружений

На эффективность естественного проветривания подземных тоннелей оказывает влияние поршневой эффект проходящего транспорта, особенно в железнодорожных тоннелях из-за значительного заполнения транспортными единицами

поперечного сечения тоннеля.

Скорость воздушного потока v, м/с, вызванного поршневым эффектом транспорта (например, поезда) прямо пропорциональна скорости v_0, м/с, его движения. Воздух, входящий в тоннель вслед за поездом, движется несколько медленнее его (рисунок 1.31, а). После выхода поезда из тоннеля поршневой эффект исчезает и движение воздуха к выходному порталу продолжается под влиянием кинетической энергии массы воздуха, находящегося в тоннеле (рисунок 1.31 , б).

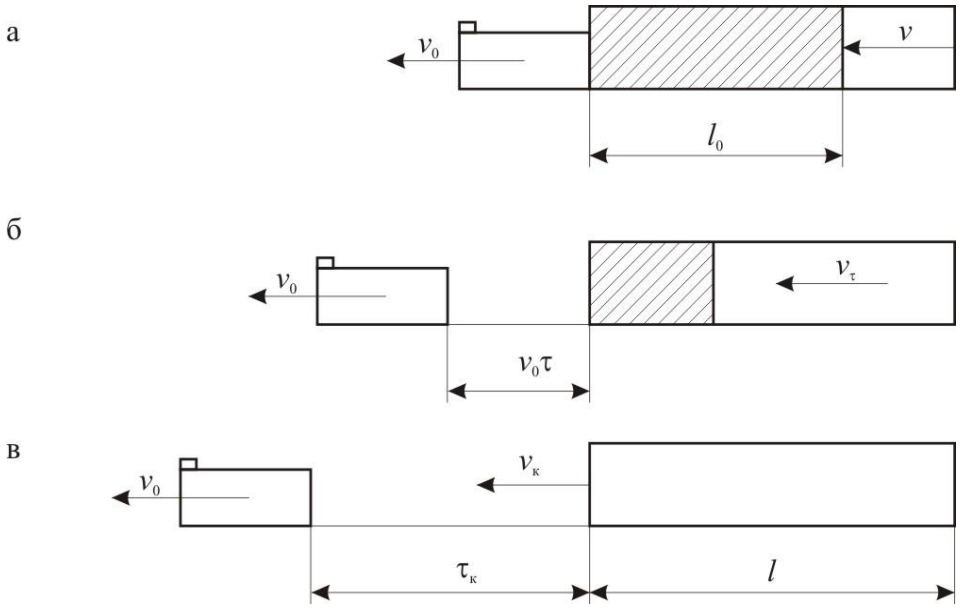


Рисунок 1.31 – Проветривание поршневым действием подвижного состава [254]

Величина отставания потока воздуха в момент выхода из тоннеля равна:

$$l_0 = l(1 - v/v_0), \tag{1.76}$$

где l – длина тоннеля.

Используя теорему об изменении кинетической энергии системы, можно найти время $\tau_к$, мин, свободного движения воздушного потока по тоннелю и величину выходной скорости воздуха $v_к$, м/с, которая должна быть достаточной для преодоления случайных факторов противоположного направления (напор естественной тяги, движение транспорта) [277]:

$$\tau_к = \frac{k}{v}(e^{\frac{l_0}{k}} - 1);\ v_к = v/e^{\frac{l_0}{k}}, \tag{1.77}$$

где $k = 2l/(\xi_т - 1)$.

Коэффициент полного сопротивления тоннеля как воздуховода $\xi_т$ равен:

$$\xi_{т} = 1{,}6 + \lambda_{тон} \frac{l}{4R}, \qquad (1.78)$$

где $\lambda_{тон}$ – коэффициент трения воздуха о внутреннюю поверхность тоннеля; R – гидравлический радиус сечения тоннеля, равный отношению площади сечения к периметру, м.

Проветривание тоннеля за счет поршневого эффекта поездов возможно при условии: $\tau_{к} \leq 15$ мин; $v_{к} \geq 0{,}15$ м/с.

Возможность естественного проветривания определяется совместным действием отдельных факторов: различие барометрических давлений у порталов тоннеля, достаточно устойчивые ветровые потоки вдоль его оси и расположение порталов на разных уровнях при наличии разности температур наружного и внутреннего воздуха. Сумма давлений в тоннеле $P_{е}$, Па, равна [183]:

$$P_{е} = \pm P_{в} \pm P_{t} \pm P_{б} \pm P_{пор}, \qquad (1.79)$$

где $P_{в}$, P_{t}, $P_{б}$, $P_{пор}$ – соответственно давления, вызванные действием ветра, разностью температур, барометрического давления и поршневым эффектом транспорта, Па.

Давление за счет динамического давления ветра, Па:

$$P_{в} = \rho_{т} v_{вт}^{2} \cos^{2} \beta / 2, \qquad (1.80)$$

где $v_{вт}$ – скорость ветра, попутного (+) или встречного (–) движению воздуха в тоннеле, м/с; β – угол между направлением ветра и осью тоннеля, град.

Давление за счет разности барометрических давлений у порталов, Па:

$$P_{б} = P_{б1} - P_{б2}. \qquad (1.81)$$

Давление, вызванное поршневым действием транспорта, движущегося в одном направлении, Па:

$$P_{пор} = \frac{S_{м}}{S_{т}} c_{т} \frac{\rho_{т}}{2} N_{т} (v_{т} \pm v_{в})^{2}, \qquad (1.82)$$

где $S_{м}$ – миделево сечение транспорта, м^2; $S_{т}$ – площадь поперечного сечения транспорта, м^2; $c_{т}$ – коэффициент лобового сопротивления транспорта; $N_{т}$ – количество транспортных единиц, одновременно находящихся в тоннеле на одной по-

лосе движения; $v_т$ – скорость движения транспорта, м/с; $v_в$ – средняя скорость движения воздуха в тоннеле, м/с.

Т.к. суммарное давление $P_е$ расходуется на преодоление сопротивлений, возникающих в тоннеле, то скорость движения воздуха в тоннеле $v_е$, м/с, равна:

$$v_е = \sqrt{\frac{2P_е}{\rho_т(\lambda_{тон}\frac{l}{d_{э.тон}} + \sum \xi_i}}\,. \qquad (1.83)$$

где $\rho_т$ – плотность воздуха в тоннеле, кг/м^3; $d_{э.тон}$ – эквивалентный диаметр тоннеля, м; ξ_i – местное сопротивление в тоннеле.

Достаточность естественного проветривания можно считать обоснованной при условии $v_е \geq L / S_т$, где L – требуемый расход воздуха в тоннеле, определяемый из условий снижения до допустимой концентрации вредных газов и установления в тоннеле нормального температурного режима.

1.4. Термодинамические обоснования расчета систем обеспечения параметров микроклимата

1.4.1. Общий подход к выявлению движущих сил тепломассопереноса

Выявление, математическое описание и количественное определение движущих сил переноса теплоты и влаги является сложной задачей ввиду переменных и нестационарных граничных и начальных условий. Численное определение интенсивности потоков теплоты и влаги еще более усложняется для насыпей биологически активной продукции, которая в процессе жизнедеятельности выделяет теплоту и влагу. Решение задач переноса теплоты и влаги в насыпях сочного растительного сырья (СРС) приводит к необходимости учета переменных по времени биологических тепло- и влаговыделений продукции.

Изучение динамики тепломассообмена в насыпях биологически активной продукции должно учитывать конечные цели расчетов и практическую значимость результатов. Хранение СРС (картофель, овощи, фрукты) должно сопровождаться минимизацией влагоотдачи продукции. В процессах сушки травы при заготовке грубых кормов по биологическим и технологическим требованиям необ-

ходима максимальная влагоотдача сырья.

Процессы тепломассопереноса могут быть описаны на основе системы уравнений Рейнольдса [28]. Система уравнений на основе одномерной α-модели включает:

– уравнение движения (Навье – Стокса)

$$\frac{\partial u_{\text{ф}}}{\partial \tau}+\frac{1}{2}\frac{\partial (u_{\text{ф}}^2)}{\partial x}=-\frac{1}{\rho_{\text{в}}}\frac{\partial p}{\partial x}+\Phi_x+\frac{\partial}{\partial x}\left(\zeta\frac{u_{\text{ф}}^2}{2}\right);$$

– уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho_{\text{в}}}{\partial \tau}+\frac{\partial (\rho_{\text{в}} u_{\text{ф}})}{\partial x}=0;$$

– уравнение баланса тепловой энергии

$$\frac{1}{u_{\text{ф}}}\frac{\partial t}{\partial \tau}+\frac{\partial t}{\partial x}=\frac{\alpha_t F_{\text{уд}}}{(c_{\text{в}}\rho_{\text{в}})_t u_{\text{ф}}\Pi}(t_{\text{пов}}-t_{\text{в}});$$

– уравнение баланса массы вещества в потенциалах влажности или влагосодержания

$$\frac{1}{u_{\text{ф}}}\frac{\partial \theta}{\partial \tau}+\frac{\partial \theta}{\partial x}=\frac{\alpha_\theta F_{\text{уд}}}{(c_{\text{в}}\rho_{\text{в}})_\theta u_{\text{ф}}\Pi}(\theta_{\text{пов}}-\theta_{\text{в}});\frac{1}{u_{\text{ф}}}\frac{\partial d}{\partial \tau}+\frac{\partial d}{\partial x}=\frac{\alpha_d F_{\text{уд}}}{\rho_{\text{в}} u_{\text{ф}}\Pi}(d_{\text{пов}}-d_{\text{в}}),$$

где Φ_x – проекция плотности массовых сил на ось x; $F_{\text{уд}}$ – площадь поверхности на 1 м длины, м^2/м.

Отсутствие обоснованных путей численного решения данной системы уравнений на ЭВМ ограничивает ее практическое использование.

Процессы тепломассопереноса в слое биологически активного сырья носят нестационарный характер в связи с изменением во времени функций состояния в отдельных точках слоя материала. Это вызывает затруднения при определении движущих сил переноса (потенциалов переноса) и теоретическом описании процессов тепломассообмена на их основе.

Основываясь на утверждении, что испарении влаги с поверхности биологического активного материала аналогично испарению ее со свободной поверхно-

сти, ряд авторов принимают за движущую силу массопереноса разность влагосодержаний [7, 227]:

$$j = \alpha_U \rho_0 (U_{\text{пов}} - U_{\text{р}}), \tag{1.84}$$

где ρ_0 – плотность (объемная масса) сухого вещества материала, кг/м^3; $U_{\text{пов}}$ – влагосодержание на поверхности материала, кг/кг сух. мат; $U_{\text{р}}$ – равновесное влагосодержание материала, кг/кг сух. мат.

Неудобство практического применения этой зависимости состоит в том, что даже при незначительном уменьшении поверхностного влагосодержания $U_{\text{пов}}$ коэффициент α_U резко увеличивается (до 1200 %) [180].

Неприменима к расчету интенсивности влагообмена между растительным сырьем и продуваемым воздухом и формула Дальтона [14, 64]:

$$j = \alpha_p (p_{\text{пов}} - p_{\text{в}}), \tag{1.85}$$

т.к. она справедлива только для стационарного процесса влагопереноса, а при сушке и хранении растительного сырья парциальные давления $p_{\text{пов}}$ и $p_{\text{в}}$ имеют переменные значения по высоте слоя. Кроме того, парциальное давление пара не может являться потенциалом переноса парообразной влаги.

М.А. Волков [64] ввел понятие градиента химического потенциала вещества для описания процессов масообмена в неизотермических условиях:

$$\begin{gathered} j_\psi = \alpha_\psi \nabla\psi; \\ \Delta\psi = (\mu_0 - \mu_{\text{Т}}) + \theta_{\text{Т}}'(T_0 - T), \end{gathered} \tag{1.86}$$

где $\theta_{\text{Т}}'$ – температурный коэффициент химического потенциала; $\mu_{\text{Т}}$ – химический потенциал тела, Дж/кмоль, являющийся эквивалентом энергии связи влаги с материалом и определяемый по формуле [52, 64, 180]:

$$\mu = RT \ln \varphi. \tag{1.87}$$

Практическое применение зависимости (1.86) затруднено в связи с возникающими теоретическими и экспериментальными проблемами при измерении свободной энергии.

М.Джоунс [91], записав уравнение изменения свободной энергии Гиббса в форме:

$$\ln K = -\Delta H^0 / RT + \Delta S^0 / R, \qquad (1.88)$$

показал, что из-за жестких экспериментальных ограничений точности определения $\Delta H°$ и $\Delta S°$ в интервале температур от 0 до 50 °С, характерном для любой биохимической системы, применение уравнения (1.88) часто приводит к недоразумениям. Изменение значений $(\Delta T)^{-1}$ в указанном температурном интервале составляет всего лишь $5{,}6 \cdot 10^{-4}$, что делает бессмысленным определение величин $\Delta H°$ и $\Delta S°$, если ошибка эксперимента превышает 1 %. Кроме того, логарифмический вид графика по уравнению (1.87) является причиной появления кажущейся константы K и одинакового наклона графика в координатах $\ln K$ от T^{-1}. Указанные недостатки ограничивают использование градиента потенциала вещества при расчете процессов массопереноса в слое растительного сырья как в процессе хранения, так и сушки.

1.4.2. Тепломассообмен в насыпи биологически активного сырья

Растительное сырье относится к капиллярно-пористым коллоидным телам. Перемещение жидкой влаги и пара в материалах такого рода обусловлено действием диффузионно-осмотических и капиллярных сил.

Наличие свободной влаги в растительном сырье обусловливает их физиологическую активность (жизнедеятельность). Среди всех биохимических процессов, протекающих в траве и зерне, особо важным является дыхание (окисление органических веществ). Реакция идет в соответствии с известным уравнением:

$$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O \qquad (1.89)$$

Теоретическое количество теплоты, выделяемой в процессе окисления, составляет около 2870 кДж на 1 гМоль [91, 99, 117, 217]. Фактическое количество выделяемой теплоты, т.е. интенсивность дыхания, зависит от влажности $w_{\text{тр}}$ и температуры сырья. Влияние этих факторов учитывается при определении удельного количества явной теплоты q_v, выделяемой травой, по формуле, предложенной T.Hendrix [313]:

$$q_v = a_t w_{\text{тр}}^{b_t} \exp(-c_t w_{\text{тр}}), \qquad (1.90)$$

где a_t, b_t, c_t – температурные коэффициенты.

Численные значения количества теплоты, выделяющейся за время сушки, экспериментально определены некоторыми исследователями [313, 338] и колеблются в широком диапазоне (от 3610 кДж/фунт до 10350 кДж/(т·ч)).

Несмотря на то, что самосогревание растительной массы ускоряет процесс сушки биологически активного сырья, выделение теплоты сопровождается распадом углеводов и денатурацией белков, т.е. потерями питательных веществ, которые могут достигать 5…10 % [117, 227, 241].

Присутствующая в растительном сырье влага имеет различные формы связи с твердым скелетом, которые определяют количество энергии, необходимое для осушения сырья. При рассмотрении растительного сырья как объекта сушки достаточно трудно выделить определенный вид связи влаги ввиду биологического происхождения материала. Поэтому, в данном случае удобнее рассматривать влагу как свободную (механически и относительно слабо физико-механически связанную) и связанную (химически и более прочно физико-механически связанную). В процессе сушки биологически активной массы удаляется свободная влага, которая в процентном соотношении составляет около 80 % [114, 118].

Гигроскопические свойства растительного сырья в состоянии термодинамического равновесия наглядно представляются в виде изотерм сорбции-десорбции (рисунок 1.32), построенных на основе экспериментальных данных [52, 155, 188]. Для описания этих кривых некоторые исследователи предлагают эмпирические зависимости [188], однако они дают только общее представление об изменении параметров в процессе обезвоживания.

А.В. Лыковым [180] объяснено явление взаимного переноса теплоты и влаги («термодиффузия влаги») и получены дифференциальные уравнения тепломассообмена в коллоидных капиллярно-пористых материалах:

$$c\rho_0 \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda \nabla^2 t + \varepsilon r_0 \rho_0 \frac{\partial U}{\partial \tau}; \qquad (1.91)$$

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = a_m (\nabla^2 U + \delta_m \nabla^2 t),$$

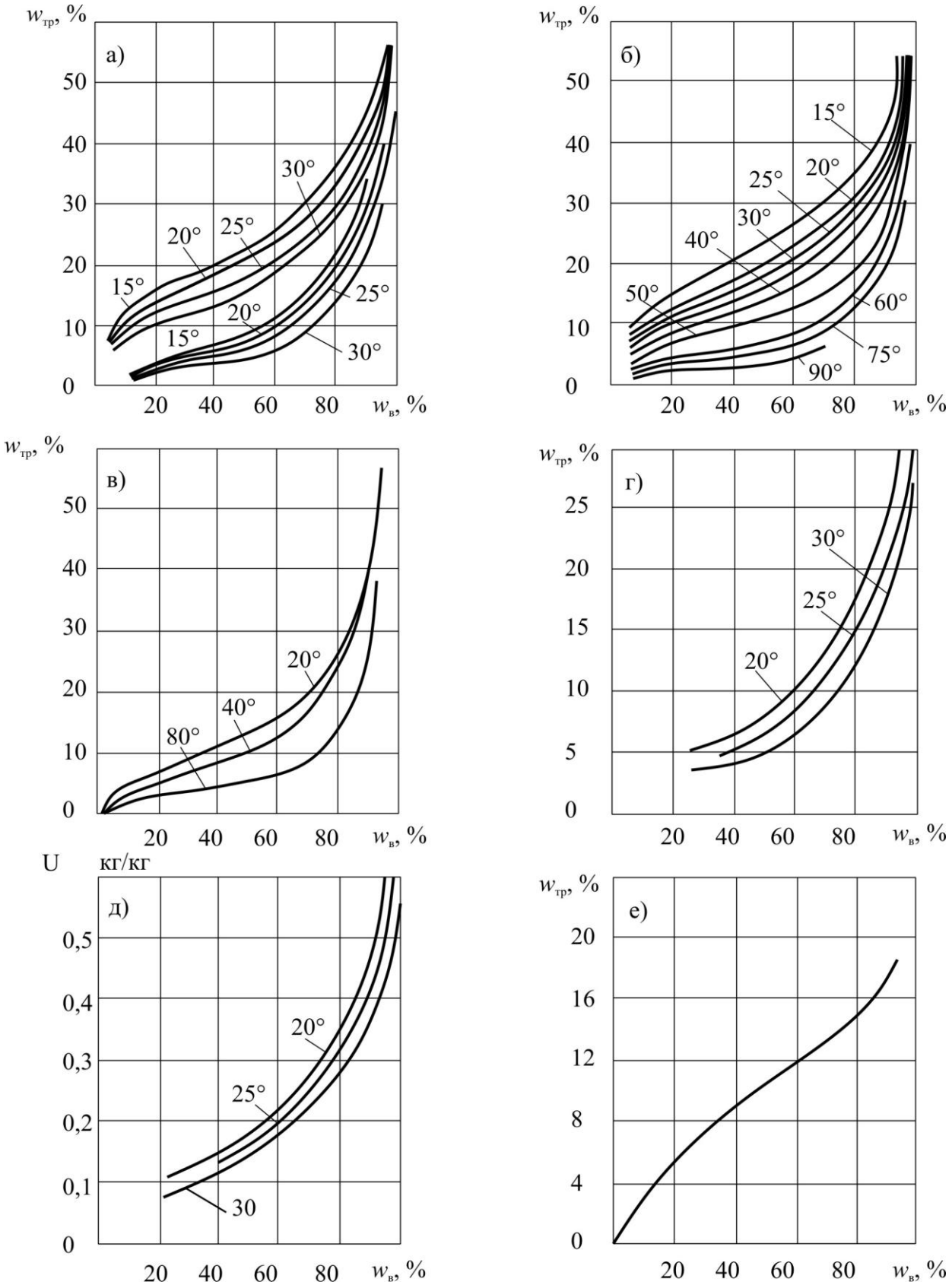


Рисунок 1.32 – Изотермы: а – сорбции и десорбции влаги для тимофеевки; б, в – десорбции влаги для сена из луговой травы; г – сорбции влаги для люцерны [52]; д – сорбции влаги для луговой травы; е – сорбции влаги для прессованной соломы [155]

где $a_m = D$ – коэффициент диффузии влаги; ∇^2 – оператор Лапласа; ε – критерий фазового превращения жидкости в пар; $r_о$ – удельная теплота парообразования; δ_m – относительный коэффициент термодиффузии ($\delta_m = a_m^т / a_m$); $a_m^т$ – коэффициент термодиффузии, которая при вынужденной конвекции дополняется внешним тепломассообменом влажного воздуха внутри слоя с поверхностью материала:

$$j = a_m \rho_0 (\nabla U + \delta \nabla t)_{пов} . \qquad (1.92)$$

Для решения уравнений (1.91) и (1.92) необходимо задать начальные и граничные условия. Трудность решения заключается в том, что как градиенты потенциалов тепло- и массообмена, так и коэффициенты переноса зависят одновременно от температуры и влагосодержания и могут быть определены только экспериментально. А.С. Гинзбург проводил такие исследования для некоторых материалов [73], однако применение системы уравнений (1.91) и (1.92) для расчетов сушки биологически активного сырья не представляется возможным.

Весь процесс сушки принято делить на два основных периода: период постоянной скорости сушки – горизонтальная прямая ($N = dw/d\tau$ = const) и период убывающей скорости сушки – наклонная кривая ($N = dw/d\tau$ = var) (рисунок 1.33).

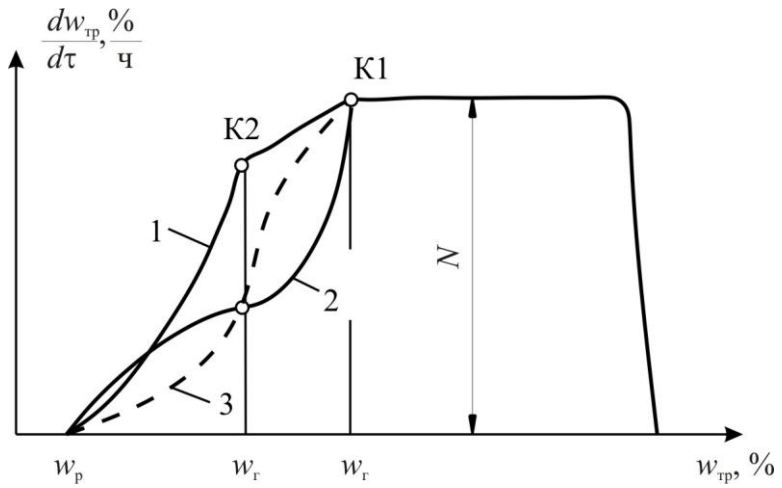


Рисунок 1.33 – Типичные кривые сушки капиллярно-пористых (1) и коллоидных капиллярно-пористых тел (2, 3) [188, 279]

В период постоянной скорости сушки вся поверхность материала водонасыщена, интенсивность сушки постоянна по величине и не зависит от влагосодержания материала – процесс влагообмена аналогичен испарению с открытой поверхности: $U_{пов} > U_г$, $p_{нас} = p_п > p_в$. Теплота, подводимая в этот период к мате-

риалу, расходуется на испарение влаги без повышения температуры самого материала ($dt/d\tau = 0$) [180]:

$$q_1 = rG_c N(t), \tag{1.93}$$

где $N(t)$ – скорость сушки, определяемая экспериментально.

Внешняя диффузия создает определенные условия для внутреннего перемещения влаги, вследствие чего возникает перепад влагосодержаний между поверхностным и внутренним слоями материала, и, как следствие, миграция влаги от центра к периферии. В результате этого процесса влагосодержание постепенно уменьшается до гигроскопического, а затем и ниже его ($U_{пов} < U_{г,} p_{нас} > p_{пов} > p_{в}$). Количество теплоты, расходуемое на испарение влаги в период падающей скорости:

$$q_2 = rG_с N(t)(w - w_р)/w_{тр}. \tag{1.94}$$

Общее количество затрачиваемой теплоты будет равно [180]:

$$q_1 + q_2 = rG_с N(t)(1 + \frac{w - w_р}{w_{тр}}) \tag{1.95}$$

Процесс конвективной сушки слоя растительного сырья ($w_{тр} > w_г$) имеет следующие особенности (рисунок 1.34) [6, 52, 93, 155, 180, 279]. Охлаждение травы/зерна протекает по изоэнтальпе до $t_м$. Постепенно зона сушки перемещается вглубь слоя. В зоне сухого сена испарение отсутствует, его параметры $t_{ск}$ и $w_{ск}$ близки к равновесным с входящим в слой воздухом $t_{во}$ и $\varphi_{во}$. В зоне сушки из-за испарения влаги $t_{во}$ сначала уменьшается до $t_м$, а затем при $\varphi_в$ близкой к 100 % может увеличиваться до температуры влажной травы. Когда зона сушки достигает пределов слоя, продувочный воздух не успевает насытиться влагой и остыть, поэтому величина $\varphi_в$ на выходе из слоя снижается, а температура возрастает. Таким образом, чем дольше находиться зона сушки в слое (чем больше отношение $\bar{h} = h_{об}/h_з$), тем выше эффективность всего процесса сушки. Важно отметить, что размеры зоны и скорость ее перемещения пропорциональны расходу воздуха L. Возрастание $\bar{h}$ может быть достигнуто либо за счет увеличения высоты слоя h, либо за счет уменьшения общего расхода $L_{об}$. При сушке предварительно провя-

ленной травы ($w_{тр} < w_г$) зона сушки занимает всю толщину слоя, $\varphi_в < 100$ %, процесс сушки замедляется. Продувка слоя большим количеством сухого воздуха также не эффективна, т.к. в этом случае наблюдается углубление зоны испарения.

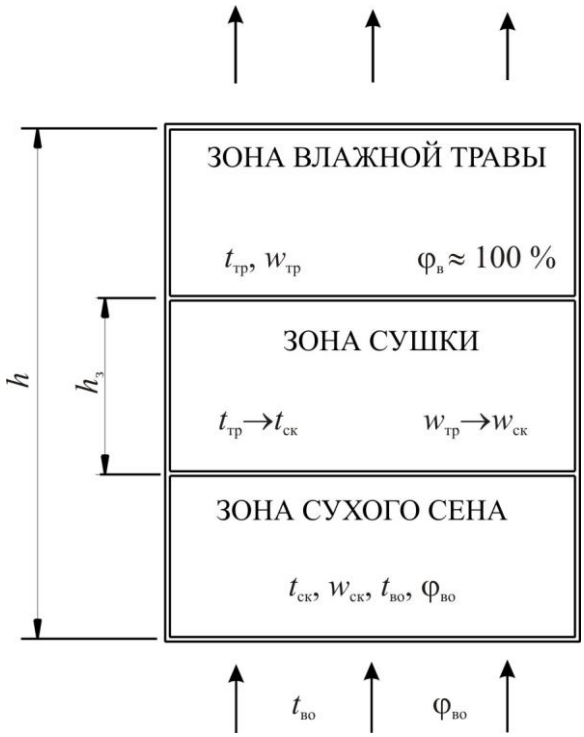


Рисунок 1.34 – Параметры травы и воздуха в продуваемом слое [227]

Теплота, выделяемая в процессе самосогревания растительной массы, интенсифицирует процесс сушки. Увеличение сорбционной способности воздуха за счет биологических тепловыделений может быть определено из уравнения:

$$\Delta d_с = d_к - d_о = 10^3 q_{vc} G_с / L_{об} r \rho_в . \qquad (1.96)$$

Общее время сушки составляет [180]:

$$\tau = \frac{w_{тр} - w_р}{N} - \frac{1}{æN}[1 + 2{,}3 \lg æ(w - w_р) . \qquad (1.97)$$

Применение уравнения (1.97) на практике не представляется возможным, т.к. большую сложность вызывает определение относительного коэффициента *æ* и скорости сушки $N = dw/d\tau$, которая в различные периоды определяется большим количеством факторов. Некоторыми авторами предложены эмпирические зависимости и номограммы для расчета продолжительности сушки [74, 83, 93, 188, 227]. Однако они не могут быть рекомендованы для широкого применения в инженерных расчетах, т.к. носят скорее частный характер.

Методики определения температурно-влажностных параметров в насыпях при хранении сочного растительного сырья также основаны на частных эмпирических зависимостях либо приближенных аналитических расчетах.

Основным недостатком предложенных методик является отсутствие учета биологических тепловыделений в насыпи. Например, Г.Б. Чижов [291] определил продолжительность охлаждения насыпи, взяв за основу формулу Ньютона $\partial t / \partial \tau = -m(t_{ср} - t_{в.о})$, считая начальную температуру постоянной ($t_{в.о}$ = const). Наличие биологических тепловыделений не учитываются и в методиках, предложенных Н.Л. Гирныком [76], Б. Опхюзом [214], В.З. Жаданом [103] и другими отечественными и зарубежными авторами [5, 64, 285, 287, 315, 331].

Имеются методики, упрощенно учитывающие выделение явной теплоты хранящейся продукции [10, 125]. В работе [10] предлагается определять производительность систем активной вентиляции картофелехранилищ по балансу явной теплоты в насыпи:

$$L_т = \frac{q_υ G}{c_в (t_{ср} - t_{в.о})}. \qquad (1.98)$$

Применение этого метода к нестационарному режиму охлаждения вызывает необходимость введения поправочного коэффициента к величине $L_т$ до 3,0.

Ю.П. Калугина [125], приняв постоянство температуры по высоте насыпи картофеля ($t_{ко}$ = const), учла биологические тепловыделения в конечном решении путем введения «расчетной» теплоемкости $c_{кр}$, полученной пересчетом теплоемкости клубней $c_к$:

$$c_{кр} = c_к + \frac{q_{vк}\tau}{(t_{к.о} - t_{к.к})} - \frac{q_{vк}\tau i}{(t_{к.о} - t_{к.к})} \qquad (1.99)$$

Отметим, что непостоянство теплофизических характеристик сырья в течение периода хранения приводит к завышению величины теплоемкости $c_{кр}$ до 20 %.

Некоторыми исследователями [5, 75, 123, 125, 293] предлагается рассматривать слой сочного растительного сырья как изотропный параллелепипед с равномерно распределенными по объему источниками теплоты, что позволяет использовать решить задачи с помощью известного решения А.В. Лыкова для пластин

[181]. Совместное решение системы уравнений тепло- и массопереноса в насыпи картофеля с учетом $q_{vк}$ и $t_{к.о}$ = const усложняет аналитическое решение данной задачи. В результате полученные численные и экспериментальные значения не обладают достаточной сходимостью [325]. К дальнейшему усложнению модели приводит учет конвективной составляющей теплопроводности насыпи [14, 271].

Наиболее полная модель тепломассопереноса, учитывающая переменные значения коэффициентов теплопроводности $\lambda_к$ и удельной теплоемкости $c_к$, предложена П.И. Дячеком [96]. Однако в результате автором получено решение по расчету температурных полей при постоянной начальной температуре $t_{к.о}$ = const и без учета биологических тепловыделений $q_{vк} = 0$.

Ввиду неудовлетворительной точности имеющихся аналитических решений по тепломассопереносу в слое сочного растительного сырья предпринимались попытки логических построений на основе опытных данных [42, 300, 307, 317, 326, 329, 330].

Таким образом, анализ теоретических и экспериментальных исследований показал отсутствие обобщенного потенциала тепломассопереноса в нестационарных условиях охлаждения насыпи сочного растительного сырья. Необходимо разработать теплофизическую модель тепломассообмена и математические методы расчета динамики температурных и влажностных параметров воздуха и продукции в насыпях сочного растительного сырья по периодам хранения.

1.4.3. Потенциал влажности как движущая сила тепломассопереноса

На основе термодинамической аналогии между переносом теплоты и влаги А.В. Лыковым был введен термин потенциала переноса вещества θ, представляющий собой потенциал переноса влаги, измеряемый в массообменных градусах (ºМ). Перенос влаги в материалах неотделим от переноса теплоты, и явления переноса теплоты и влаги должны рассматриваться в неразрывной связи. Такая постановка вопроса позволила применить к переносу влаги те же методы и ту же систему понятий, что и к явлениям переноса теплоты, которые в достаточной степени изучены [182].

По аналогии с основным законом теплопроводности удельный поток влаги i, кг/(м^2·ч), пропорционален градиенту потенциала переноса влаги:

$$i = -\lambda_m \nabla\theta, \qquad (1.100)$$

где λ_m – коэффициент пропорциональности, аналогичный коэффициенту теплопроводности в законе Фурье, названный коэффициентом массопроводности, кг/(м·ч·ºМ); $\nabla\theta$ – градиент потенциала переноса влаги, ºМ /м.

Значение градиента потенциала переноса влаги определяется в зависимости от факторов, вызывающих перемещение влаги в материале. В случае диффузионного переноса пара градиент $\nabla\theta$ пропорционален градиенту упругости водяного пара ∇e, а при диффузионном переносе жидкости – градиенту осмотического давления.

Если потенциал переноса влаги является функцией удельного массосодержания u, кг/кг сух. в-ва, то подразумевается, что влагоперенос осуществляется за счет градиента влажности материала ∇u, лежащего в основе теории влагопроводности.

Согласно теории А.В. Лыкова, градиент потенциала переноса влаги равен [182]:

$$\nabla\theta = \frac{1}{c_m}\nabla u, \qquad (1.101)$$

где c_m – удельная изотермическая массоемкость (влагоемкость), кг/(кг· ºМ); ∇u – градиент влагосодержания материала, кг/(м ·кг сух. в-ва).

На основании экспериментальных данных А.В. Лыковым была построена шкала потенциала переноса вещества при изотермических условиях. Метод построения шкалы заключается в определении удельных массосодержаний (влагосодержаний) исследуемого и эталонного тела, приведенных в непосредственное соприкосновение друг с другом и находящихся в состоянии влажностного равновесия. Используется аналогия с определением удельной теплоемкости тела, приведенного в тепловое равновесие с эталонной жидкостью, удельная теплоемкость которой принимается равной единице. Для перехода к шкале потенциала задается величина удельной массоемкости эталонного тела, равная одной сотой максимального сорб-

ционного массосодержания (максимальная гигроскопическая влажность):

$$c_э = \frac{U_c}{100}, \qquad (1.102)$$

где $c_э$ – удельная изотермическая массоемкость эталонного тела, кг/(кг· ºМ); $U_с$ – максимальное сорбционное массосодержание (максимальная сорбционная влажность), кг/кг сух. в-ва.

Тогда потенциал переноса вещества будет равен:

$$\theta = \frac{U_э}{c_э} = \frac{100U_э}{U_c}. \qquad (1.103)$$

Из (1.103) вытекает, что при влажности эталонного тела $U_э$, равной максимальной гигроскопической $U_с$, потенциал переноса вещества равен 100 единицам.

В качестве эталонного тела принята фильтровальная бумага, имеющая большую гигроскопичность. Максимальная сорбционная влажность фильтровальной бумаги равна $U_с$ = 0,267 кг/кг сух. в-ва при температуре t = 22 ºС. На рисунке 1.35 приведена зависимость между удельными массосодержаниями торфа и фильтровальной бумаги и шкала потенциала переноса влаги.

На рисунке 1.36 приведены экспериментальные кривые для песка, древесины и красной глины.

Профессором В.Н. Богословским разработан метод расчета интенсивности взаимосвязанного тепломассообмена на основе потенциала влажности [20, 27], который позволяет учесть действие различных силовых факторов на влагу, находящуюся как в жидком, так и в парообразном состоянии. Термодинамические функции состояния отдельного компонента или фазы (внутренняя энергия, энтальпия, свободная энергия и т.д.) можно выразить с помощью трех независимых переменных: массы m, объема V и температуры T. Тогда, изменение свободной энергии для влаги в жидком состоянии можно записать в виде:

$$dF_ж = -s_ж dT + \left(-\frac{p_ж}{\rho_ж} + \mu_ж + \sum \mu_{жj} + \theta_г \right) dm_ж, \qquad (1.104)$$

где $s = \partial F/\partial T$ – энтропия;

$p = \partial F/\partial V$ – давление;

$\mu = \partial F/\partial m$ – химический потенциал фазы.

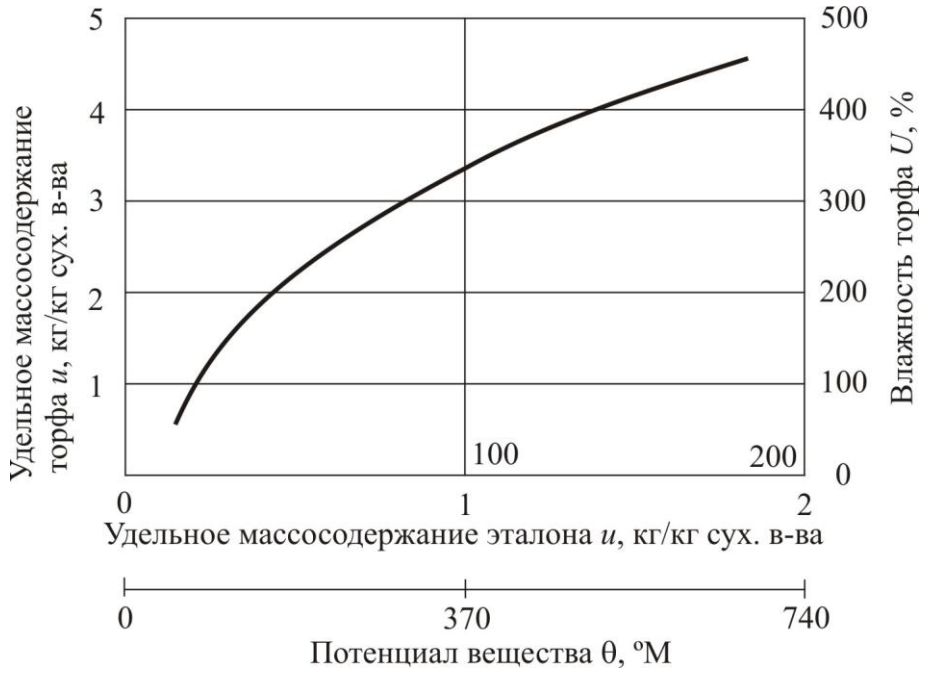


Рисунок 1.35 – Зависимость между удельными массосодержаниями торфа и фильтровальной бумаги в состоянии термодинамического равновесия [182]

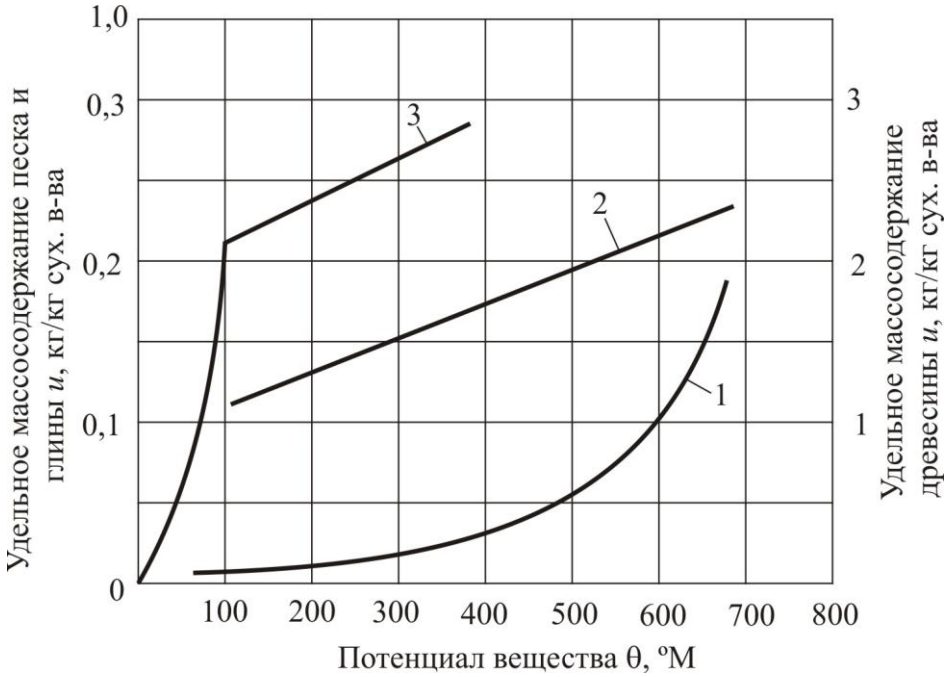


Рисунок 1.36 – Зависимость удельных массосодержаний от потенциала переноса вещества: 1 – песка; 2 – древесины (сосна); 3 – красной глины [182]

Зависимость (1.104) представляет собой основное термодинамическое уравнение Гиббса для открытой гетерогенной системы, преобразованное с учетом наличия в фазе жидкой влаги растворенных примесей и влияния гравитационного поля. Выражение в скобках по физическому смыслу является полным термодинамическим потенциалом θ (потенциалом влажности), за счет которого и происходит перенос вещества фазы:

$$\theta = -\frac{p_ж}{\rho_ж} + \mu_ж + \sum \mu_{жj} + \theta_г . \qquad (1.105)$$

Т.к. показатели интенсивности движения (*p, T,* μ, θ) отдельных фаз влаги равны и не зависят от массы и числа частиц фазы, а их показатели емкости (*V, m, F, S,* Ф) имеют аддитивный характер, то состояние гетерогенной системы можно описать уравнением:

$$dF = -SdT + \theta dm. \qquad (1.106)$$

Для практического применения потенциала влажности была введена специальная шкала, построение которой основано на следующем постулате: два влажных тела, находясь во влажностном равновесии с третьим влажным телом, сами находятся во влажностном равновесии [27]. Величиной, равной для всех тел и характеризующей их влажностное равновесие, как это следует из уравнения (1.106), является потенциал влажности θ. Равенство потенциалов влажности во всех точках системы, состоящей из нескольких влажных тел, представляет собой первый закон положения о потенциале.

Потенциал влажности θ не может быть непосредственно измерен, т.к. зависит от величины химического потенциала, давления и других факторов, измерить которые в опыте нельзя. Это обстоятельство вызвало необходимость введения специальной шкалы для определения величины потенциала θ, которая представляет собой изменение равновесной влажности эталонного материала (фильтровальной бумаги) от сухого состояния (0 °В) до максимальной гигроскопической влажности (100 °В) при эталонной температуре (+20 °С) (рисунок 1.37).

Второй закон положения о потенциале гласит, что перенос влаги происходит в направлении от большего потенциала к меньшему. Удельный поток влаги *i*, кг/(м^2·ч), в материале пропорционален градиенту потенциала влажности

$$i = \chi \nabla \theta , \qquad (1.107)$$

где χ – коэффициент влагопроводности, кг/(м·ч·°В); ∇θ – градиент потенциала влажности, °В/м.

По аналогии с другими физическими явлениями поток влаги с поверхности влажного материала пропорционален градиенту потенциала влажности:

$$j_\theta = \alpha_\theta(\theta_{пов} - \theta_в), \qquad (1.108)$$

где $\theta_{пов}$ – потенциал влажности на поверхности материала, °В; $\theta_в$ – потенциал влажности продувочного воздуха, °В; α_θ – коэффициент влагопереноса, кг/(кг·ч·°В)

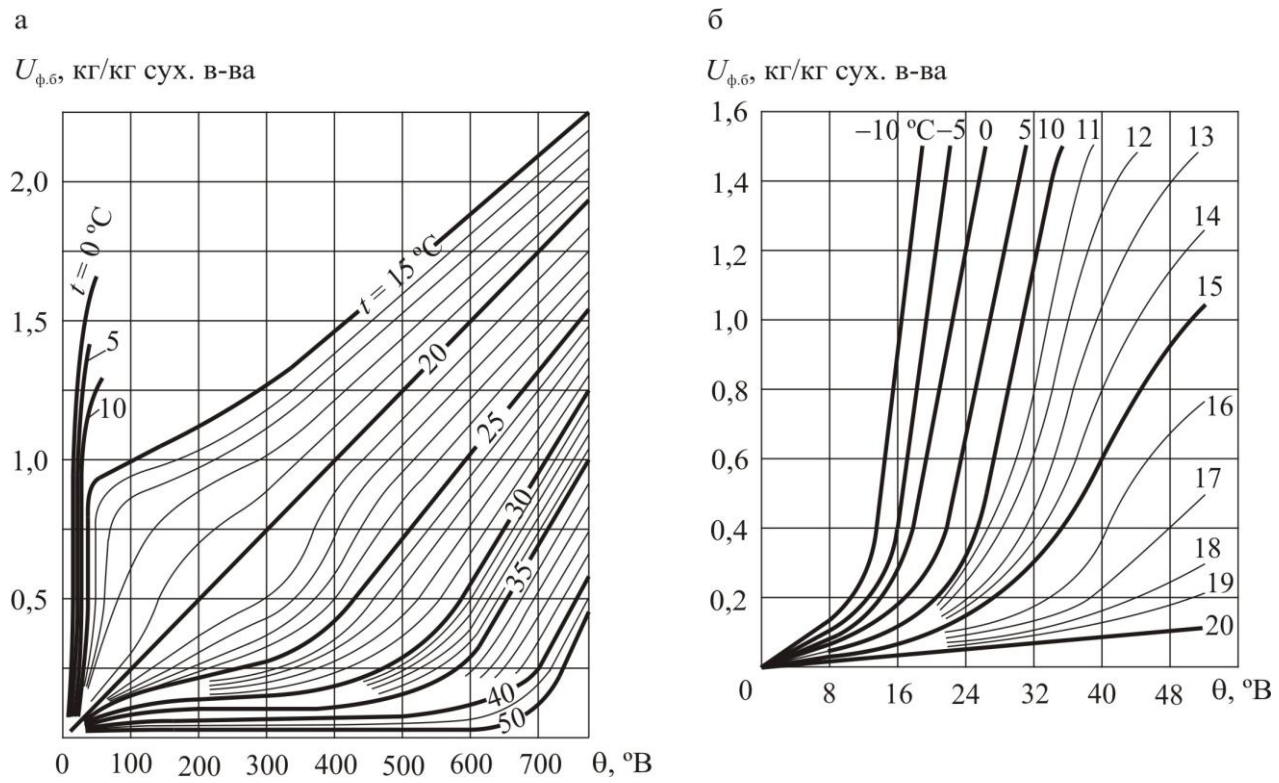


Рисунок 1.37 – Шкала потенциала влажности - зависимость между потенциалом влажности и влажностью фильтровальной бумаги при различных температурах:
а) в диапазоне 0…700 ºВ; б) в диапазоне 0…50 ºВ

Для однозначной оценки состояния влажного материала используется понятие относительного потенциала влажности:

$$\varphi_\theta = f_1(\theta) / f_2(\theta_{мс}), \qquad (1.109)$$

где $\theta_{мс}$ – потенциал, соответствующий максимальной сорбционной влажности.

На практике удобно пользоваться графическим методом определения относительного потенциала влажности φ_θ в зависимости от $U_{ф.б.}$ (рисунок 1.38) [20].

Процесс влагопроводности в материале описывается следующим дифференциальным уравнением поля потенциала влажности [27]:

$$\eta(\theta, t)\rho_0 \frac{\partial\theta}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}\left[\chi(\theta, t)\frac{\partial\theta}{\partial x}\right], \qquad (1.110)$$

где η – влагоемкость материала, кг/(ºВ ·кг сух. в-ва), при данной температуре:

$$\eta = dU/d\theta\,, \tag{1.111}$$

где U – влагосодержание материала, кг/кг сух. в-ва.

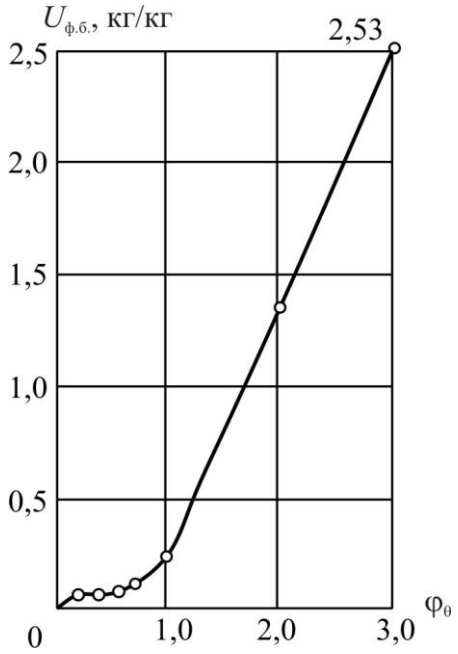


Рисунок 1.38 – Шкала относительного потенциала влажности

Основным преимуществом теории расчета тепломассопереноса на основе понятия потенциала влажности является возможность описания процесса одним уравнением, учитывающим влияние температуры на тепло- и влагообмен как при изотермических, так и при неизотермических условиях [24, 31]. Развитию теории и практики потенциала влажности посвящены работы А.Г. Перехоженцева [147, 215], В.Г. Гагарина [23, 67, 68], Е.И. Тертичника [272, 273, 274], А.С. Микшера [25], С.В. Корниенко [147, 148, 149, 150], А.Н. Гвоздкова [24, 26, 70], В.В. Козлова [68, 138], Б.В. Абрамова [19], В.И. Бодрова [42], K. Kieβl [319], H.M. Kunzel [322, 324].

Для разработки методики расчета тепломассообмена 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 α_θ и разность потенциалов $\Delta\theta$ и определение их количественных значений. Также требует термодинамического обоснования линии постоянных потенциалов θ = const на I–d–θ-диаграмме.

Проектирование строительных конструкций на основе теории потенциала

влажности затруднено отсутствием для большинства строительных материалов теплофизических характеристик в шкале потенциала влажности. В технической литературе имеются лишь экспериментальные зависимости коэффициента влагопроводности χ, кг/(м·ч·°В), от потенциала влажности θ, °В, полученные В.Н. Богословским [27] для пенобетона и кирпича (рисунок 1.39). Поэтому существует необходимость в определении значения коэффициента влагопроводности χ, кг/(м·ч·°В), для различных строительных материалов в шкале потенциала влажности с целью дальнейшего его использования в расчетах теплофизических характеристик наружных ограждающих конструкций.

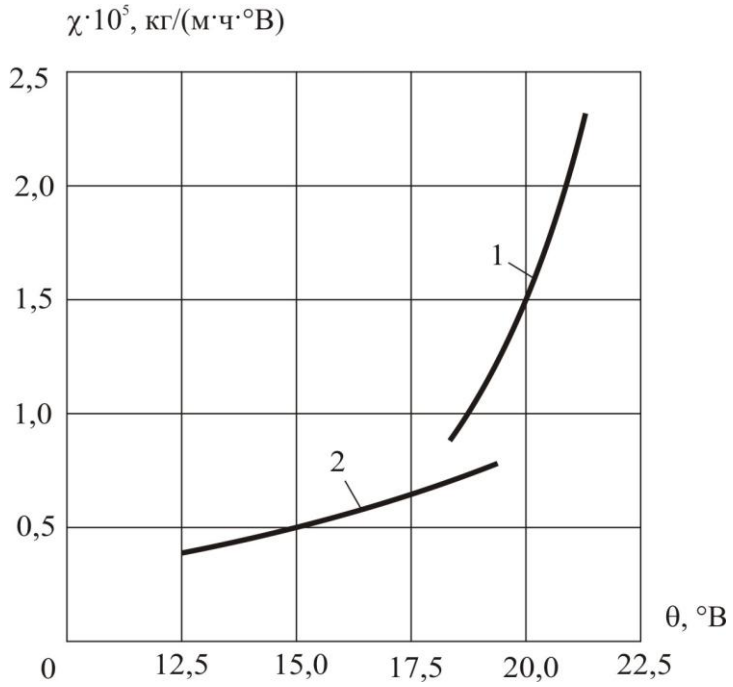


Рисунок 1.39 – Экспериментальная зависимость коэффициента влагопроводности от потенциала влажности: 1 – для пенобетона; 2 – для кирпича [27]

1.5. Методологический подход к совершенствованию систем обеспечения микроклимата

Существующий в настоящее время общий методологический подход к снижению потребления энергии в жилых и производственных сельскохозяйственных зданиях и сооружениях заключается в разработке инженерных мероприятий по доведению реальных расходов энергии до расчетных. Понятие энергоэффективности систем обеспечения параметров микроклимата, включающее полное ис-

пользование высокопотенциальной и низкопотенциальной искусственно генерируемой энергии, подменяется и сужается до понятия энергосбережения. Энергосбережение является административной мерой снижения сверхнормативных потерь энергии системами, вызванных ошибками при проектировании, монтаже или эксплуатации систем в нерасчетных условиях.

Разработанный в диссертации 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.

Системный подход к выявлению динамики и закономерностей формирования параметров микроклимата приводит к необходимости выделения как жилых зданий, так и производственных сельскохозяйственных зданий и сооружений в отдельные самостоятельные классы по нормированию и расчету энергоэффективных систем обеспечения оптимальных и допустимых параметров внутреннего воздуха.

Данный методологический подход обосновывается следующими специфическими особенностями формирования комфортной среды в рассматриваемых помещениях (рисунок 1.40). В жилых зданиях к ним можно отнести нестационарность, нерегулируемость начальных и граничных условий, например: переменный аэродинамический режим не только нерегулируемой естественной, но и механической вентиляции из-за изменения температуры наружного воздуха, направления и скорости ветра в течение сезона или суток, на которые дополнительно накладываются переменное располагаемое давление по этажам; конструктивные особенности теплового контура помещений (герметичность окон, входных дверей); различные тепловыделения, зависящие от назначения помещений и количества проживающих людей. Эти и множество других условий не позволяют составить адекватную систему уравнений по аналитическому расчету воздушного и теплового

баланса помещений многоквартирных жилых домов.

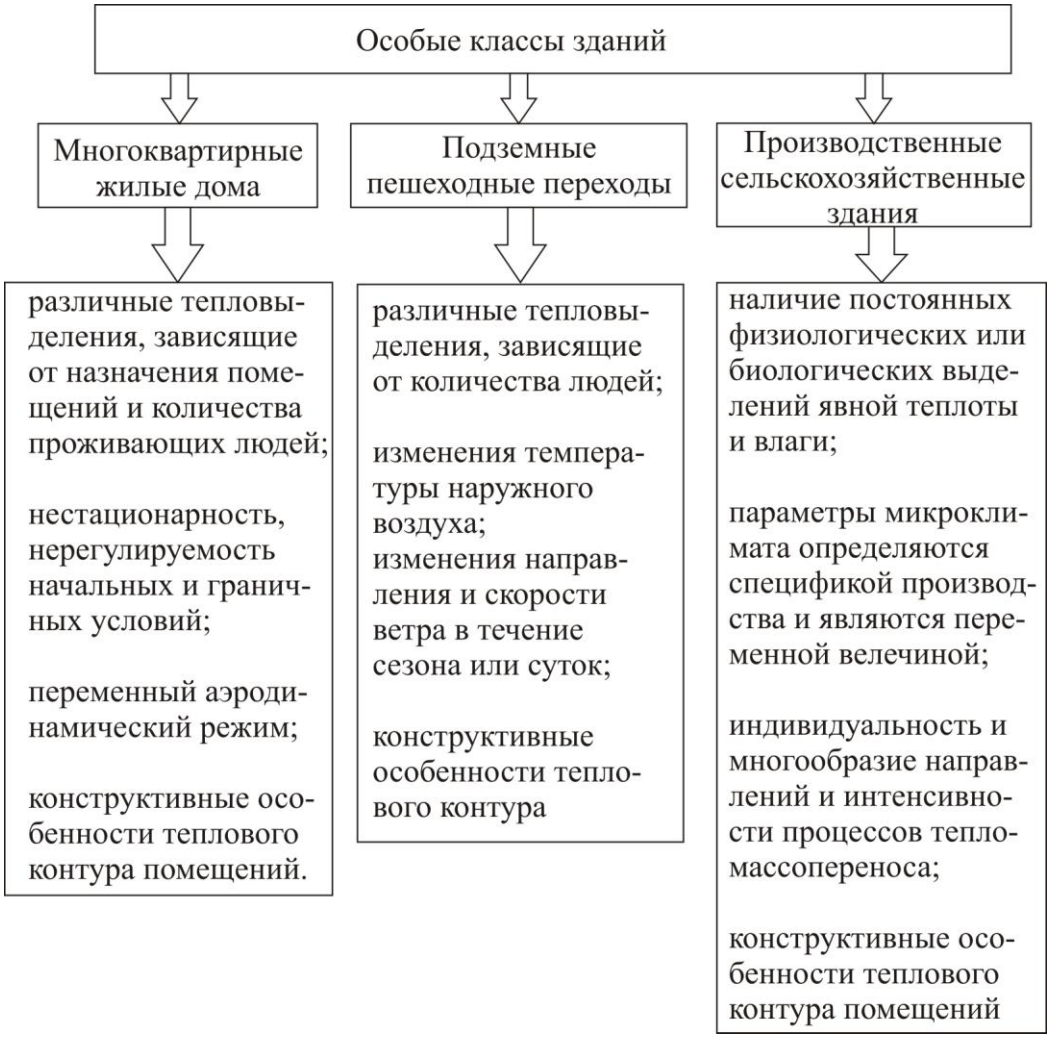


Рисунок 1.40 – Особенности формирования микроклимата в зданиях и сооружениях различного назначения

Особенностями формирования параметров микроклимата помещений производственных сельскохозяйственных зданий и сооружений являются: наличие в холодный период года постоянных физиологических или биологических выделений явной теплоты делает основной функцией теплового контура удаление (рассеивание в атмосферу) тепловыделений с обеспечением условий предупреждения переохлаждения животных, птиц, хранящегося сочного растительного сырья; нормирование теплозащитных показателей теплового контура должно основываться на объективных характеристиках конкретных сооружений с учетом их объемно-планировочных решений и технологий производства, приводящие к однозначному результату; индивидуальность и многообразие направлений и интенсивности процессов тепломассопереноса (например, минимизация влагоотдачи от

хранящегося сочного растительного сырья и максимальный влагообмен при сушке травы).

Предлагаемый системный подход включает разработку и изучение объемно-планировочных и инженерно-конструктивных моделей. Первая модель основана на принципе компактности и формирования буферных зон при оптимизации аэродинамических и теплофизических показателей зданий, что позволяет определять рациональные композиционные, пространственные и конструктивные параметры при различных внешних воздействиях. К последним можно отнести круглогодичное изменение параметров наружного воздуха (температура, относительная влажность, подвижность по румбам, интенсивность солнечной радиации и др.)

Вторая модель, неразрывно связанная с первой, включает системы жизнеобеспечения, оценивает параметры комфортности помещений и экономичности при наличии различного теплообеспечивающего инженерного оборудования. Она раскрывает физические возможности использования и области практического применения естественных источников энергии (физиологической, биологической, ветровой, солнечной радиации и др.) в круглогодичном режиме эксплуатации систем, регенерации и утилизации тепловой энергии.

1.6. Выводы по главе 1

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.

1. Для создания и поддержания расчетного температурно-влажностного режима помещений пассивными системами обеспечения параметров микроклимата энергоэффективных зданий и сооружений 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.

2. Требования по поддержанию стабильных значений сопротивлений теплопередаче и паропроницанию наружных ограждений индивидуальны для энергоэффективных зданий различного функционального назначения. Закономерности интенсивности и движущие силы влагопереноса через строительные конструкции, пригодные для практических расчетов, требуют теоретических уточнений и экспериментального подтверждения.

3. Для многоквартирных жилых домов отсутствует единая методика расчета систем канальной естественной вентиляции, учитывающей наличие в здании теплого чердака. Не выявлены теоретические, практические, экономические и конструктивные обоснования применения систем механической приточно-вытяжной вентиляции.

4. Стабилизация температурного режима неотапливаемых (без подачи искусственно генерируемой энергии) производственных сельскохозяйственных зданий может быть обеспечена при постоянстве теплофизических характеристик наружных ограждений, которое достигается при нормативной влагопередаче через них. Критерии интенсивности и движущие силы переноса водяных паров и капельной

влаги через ограждения требуют дополнительного уточнения, изучения и экспериментальной проверки.

5. Показано отсутствие термодинамического обоснования динамики максимальной (при сушке) и минимальной (при хранении) интенсивности влагообмена в слое биологически активной продукции. Не разработаны методики расчета режимов и технологических характеристик тепломассообмена в системе «влажный воздух – слой биологически активного сырья» в зависимости от конечных целей процессов переноса.

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

7. Создание и эксплуатация систем обеспечения параметров микроклимата энергоэффективных зданий и сооружений базируется на наиболее полном использовании естественных источников энергии: гравитационной, ветровой, на эффекте аэрации. Не выявлены и требуют научного уточнения конкретные области их наиболее рационального применения в зданиях различного функционального назначения.

8. Создание допустимых температурно-влажностных и воздушных режимов в подземных пешеходных переходах возможно при технологическом и экономическом обосновании областей применения естественной и механической вентиляции. Такой анализ возможен при решении задачи по выявлению и количественному обоснованию движущих сил переноса масс воздуха по тоннелям переходов.

9. Анализ теоретических и экспериментальных исследований показал на отсутствие теплофизической модели тепломассообмена и математических методов расчетов динамики температурных и влажностных параметров воздуха в насыпях биологически активной продукции.

10. Для практических инженерных расчетов динамики процессов переноса теплоты и влаги на основе полного термодинамического потенциала фаз необходимы теоретические разработки и графическое нанесение значений потенциалов влажности воздуха на I–d-диаграмму.

Глава 2. АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ МНОГОЭТАЖНЫХ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ

2.1. Аэродинамическая модель системы вентиляции

2.1.1. Анализ методов расчета потерь давления в системах

Для определения потерь давления в системах вентиляции многоэтажных жилых зданий (МЖД) используют метод полных потерь давления и метод статических давлений (раздел 1.3.3). Для аналитической оценки эффективности работы системы вытяжной естественной вентиляции МЖД под руководством автора были проведены аэродинамические расчеты, которые включали определение потерь давления в вытяжных каналах при заданной конструкции системы и сравнение полученных значений с величиной расчетного располагаемого давления [248]. Расчеты проводились для типового девятиэтажного жилого дома. Основные конструктивные характеристики системы вентиляции представлены в приложении 1. Количество этажей, через которое осуществляется присоединение боковых каналов к сборному, в вентиляционных системах кухонь $y_1 = 2$, санитарных узлов $y_1 = 3$. Расчетные расходы вытяжного воздуха принимались согласно нормативным документам и составляли $L_{кух} = 60$ м^3/ч, $L_{с.у} = 50$ м^3/ч. Результаты расчета представлены на рисунке 2.1.

Потери давления в системе естественной вентиляции жилого девятиэтажного дома, смонтированной из типовых железобетонных вентиляционных блоков, снижаются по высоте здания. Такие результаты получены по обеим методикам. На двух верхних этажах наблюдается совпадение значений полученных по методу статических давлений и методу определения полных потерь давления. По нашему мнению, это связано с тем, что боковые ответвления данных этажей присоединяются непосредственно к диффузору, т.е. не имеют тройников. Основное расхождение в данных, полученных по вышеприведенным методикам, заключается в различном подходе к определению потерь давления в тройниках и составляет от –1 до 2 Па. При этом максимальная разница наблюдается на первом этаже.

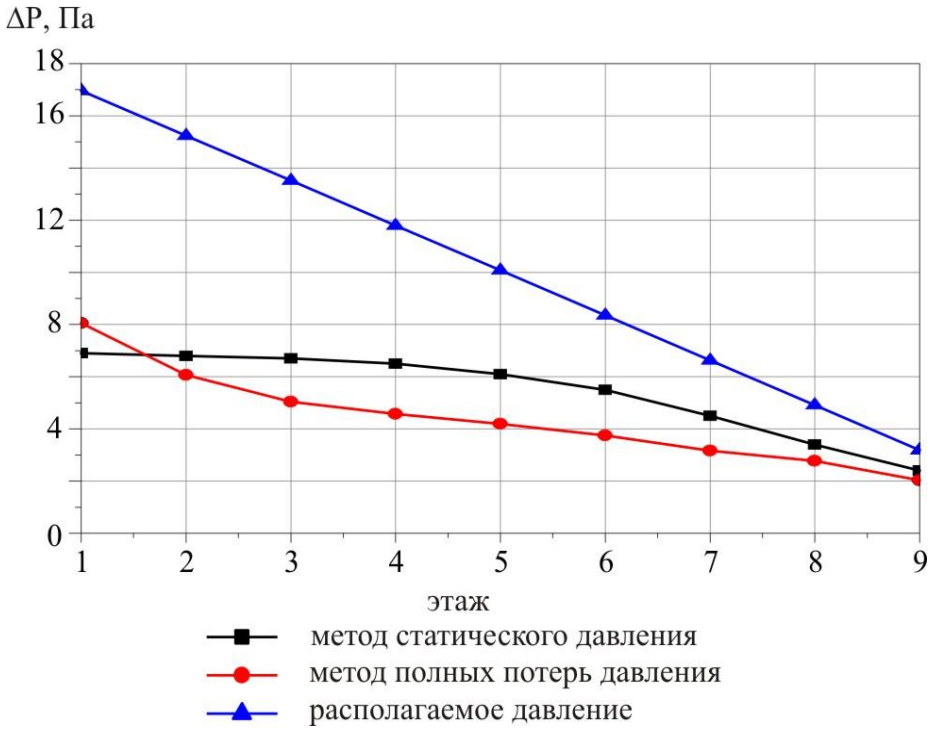


Рисунок 2.1 – Потери давления и располагаемое давление для девятиэтажного жилого здания

В методе определения полных потерь давления учитывается коэффициент местного сопротивления бокового ответвления тройника при равных расходах бокового ответвления и сборного канала. Данное значение коэффициента местного сопротивления и дает значительное повышение потерь давления на первом этаже.

В связи с этим определение потерь давления по методике полных потерь давления является более точным и приближенным к реальным условиям эксплуатации тройников, образованных вентиляционными блоками.

Традиционный метод определения расчетных располагаемых давлений при проектировании систем вытяжной вентиляции с естественным побуждением основан на допущении равенства давлений в помещениях и давления наружного воздуха на одном уровне, что означает пренебрежение сопротивлением воздуха при поступлении его через окна [89]. Реально это может наблюдаться только в теплый период года, когда в помещениях всех этажей открыты форточки или окна. В зимнее время это допущение не соответствует действительности. В 50-х годах прошлого века были разработаны методы определения располагаемых давлений в системах вентиляции с учетом фактических давлений в помещениях, определяемых на основе расчета воздухообмена в зданиях как единой аэродинамической системы. Первый из методов предназначен для расчета систем приточно-

вытяжной вентиляции, а второй – для систем вытяжной вентиляции с естественным побуждением. Оба метода основаны на крайнем допущении, состоящем в том, что окна на всех этажах полностью закрыты и имеют одинаковую воздухопроницаемость.

Регулирование воздухообмена в жилых помещениях осуществляется путем открывания форточек, начиная с температуры наружного воздуха $t_н$ = 5 °С. Располагаемое давление определяется зависимостью (1.59)

Для зданий с теплым чердаком при аэродинамическом расчете чердак принимается как часть системы и считается камерой статического разрежения. Разрежение на чердаке должна обеспечивать вентиляционная шахта. Температура воздуха в чердачном помещении в расчетах не учитывается, однако встречаются данные о ее влиянии на работу системы вентиляции. По мнению авторов [136] снижение температуры воздуха на теплом чердаке приводит к охлаждению вытяжного воздуха, что вызывает опрокидывание циркуляции или снижение расходов вытяжки. Влияние повышения или понижения температуры воздуха на чердаке на работоспособность и производительность систем естественной вентиляции жилых зданий с теплым чердаком до сих пор не имеет однозначного количественного обоснования.

Как видно из рисунка 2.1, располагаемое давление в значительной степени превышает потери давления в системе, полученные по разным методам. Превышение составляет от 9 Па на первом этаже до 1 Па на верхнем. Таким образом, теоретически рассматриваемая система вентиляции работоспособна. Кроме того, имеющийся запас располагаемого давления должен привести к увеличению воздухообменов по всем этажам здания, однако в натурных условиях данные не подтверждаются (раздел 2.2.2).

2.1.2. Физико-математическая модель системы естественной вытяжной вентиляции

Действующая в нашей стране нормативная документация [262, 263] достаточно жестко регламентирует величину требуемого расчетного воздухообмена в

помещениях многоквартирных жилых домов (МЖД), как правило, оборудованных системами естественной приточно-вытяжной вентиляции. Одной из главных проблем при эксплуатации данных систем является определение фактических воздухообменов жилых помещений с целью выявления отступлений от расчетных значений, вызванных внесением конструктивных изменений в системы в процессе их монтажа и последующих ремонтных работ [43].

Предлагаемая физико-математическая модель позволяет определить фактические производительности вентиляционных каналов $L_ф$, м^3/ч, путем автоматизированного расчета с отказом от переменных факторов, имеющих место при проведении натурных измерений, например: изменение направления ветра; нерасчетные избытки теплоты в помещениях; ограничение доступа в отдельные помещения и т.д., т.е. одним из основных преимуществ автоматизированного определения фактических производительностей вентиляционных каналов является возможность решения данной задачи инженерными средствами дистанционно.

Принципиальная схема для расчета системы естественной вентиляции МЖД с вертикальным сборным коллектором с указанием расчетных направлений движения воздуха приведена на рисунке 2.2.

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

$$\sum p_j^n = p_г^n + p_в^n, \tag{2.1}$$

где $\sum p_j^n$ – суммарные потери давления на j-х участках вентканала, определяемые в зависимости от характера местного сопротивления по формулам (2.2) и (2.3), Па; $p_г^n$ – расчетное располагаемое гравитационное давление, Па; $p_в^n$ – расчетное располагаемое ветровое давление, Па.

Потери давления на трение для j-го участка вентканала Δp_j, Па, определяются по формуле:

$$\Delta p_j = 0{,}11\left(\frac{k_j\left(a_j + b_j\right)}{2a_j b_j} + \frac{68\left(a_j + b_j\right)\mu_j}{2v_j a_j b_j \rho}\right)^{0{,}25} \frac{\left(a_j + b_j\right)}{2a_j b_j}\frac{v_j^2}{2}\rho, \tag{2.2}$$

где a_j, b_j – соответственно, ширина и высота вентканала, м; k_j – эквивалентная шероховатость внутренней поверхности; μ_j – коэффициент динамической вязкости, Па·с; ρ_j – плотность удаляемого внутреннего воздуха, кг/м³; $v_j = L_j/(3600a_jb_j)$ – скорость движения воздуха, м/с.

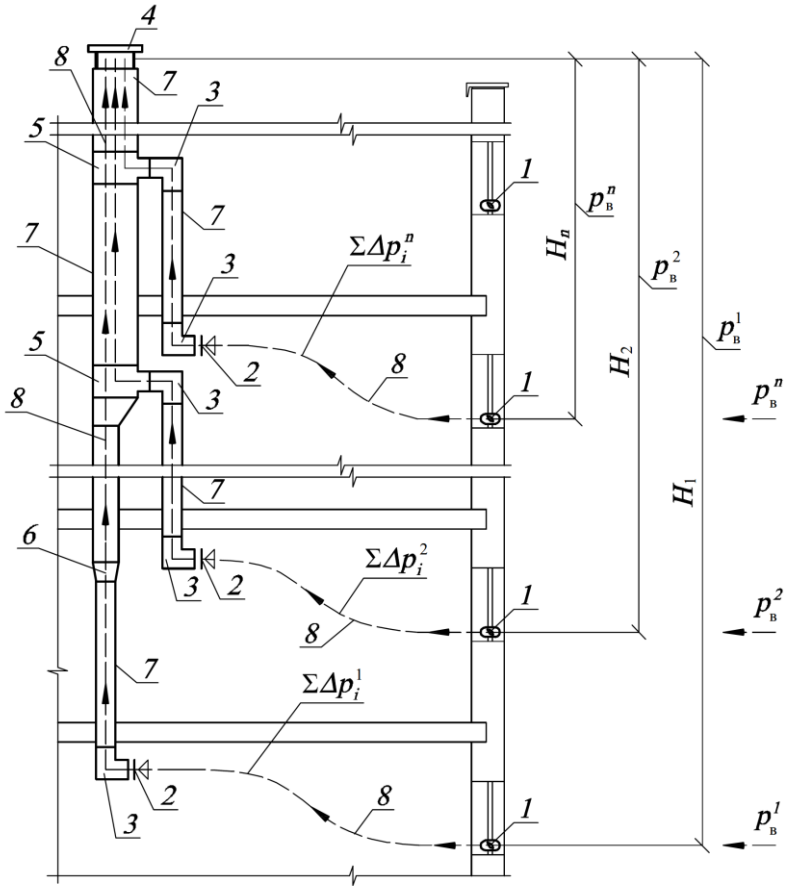


Рисунок 2.2 – Принципиальная схема для расчета вертикального сборного коллектора: *1* – приточный клапан; *2* – вытяжная решетка; *3* – колено (отвод); *4* – зонт-колпак; *5* – тройник; *6* – переход; *7* – линейный участок воздуховода; *8* – расчетное направление движения воздуха; H_1, H_2, H_n – высоты столба воздуха от отметки установки приточного клапана на рассматриваемых 1, 2 … *n* этажах здания до отметки оголовка вытяжной шахты

Потери давления в *j*-м постоянном местном сопротивлении (позиции *1–4*, *6* на рисунке 2.2) определяются безразмерными коэффициентами местного сопротивления ξ_i, являющимися справочной величиной [61]:

$$\Delta p_j = \xi_j \frac{v_j^2}{2}\rho. \qquad (2.3)$$

Потери давления в *j*-м переменном местном сопротивлении (позиция *5* на рисунке 2.2) определяются по эмпирическим зависимостям, приведенным в исследованиях [111].

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

$$\begin{cases} \sum p^1 = p^1_{\text{г}} + p^1_{\text{в}} \\ \sum p^2_j = p^2_{\text{г}} + p^2_{\text{в}} \\ \ldots \\ \sum p^n = p^n_{\text{г}} + p^n_{\text{в}} \end{cases}, \qquad (2.4)$$

где j = 1, 2…n; n – число этажей.

При подстановке в данную систему уравнений всех зависимостей, являющимися составляющими формул (2.2) и (2.3), получаем систему алгебраических уравнений, нелинейных относительно v_j.

Методы аналитического решения систем нелинейных алгебраических уравнений в настоящее время разработаны слабо, для их решения обычно применяются итерационные численные методы: простых итераций, Ньютона, обобщенного приведенного градиента и т.д [43].

Метод последовательных приближений (метод итераций) решения уравнения $x = f(x)$ основан на принципе сжимающих отображений.

Пусть (X, ρ) – метрическое пространство, f – отображение, действующее в данном метрическом пространстве. Отображение f метрического пространства (X, ρ) в себя называется сжимающим, если существует такое число $\alpha \in (0;1)$, что для любых двух точек x', $x'' \in X$ выполняется неравенство:

$$\rho(f(x'), f(x'')) \le \alpha\rho(x', x''). \qquad (2.5)$$

Сжимающее отображение f полного метрического пространства (X, ρ) в себя имеет единственную неподвижную точку, точнее, существует единственная точка $x^* \in X$, являющаяся решением уравнения $x = f(x)$, причем справедливо равенство $x^* = \lim_{n\to\infty} f(x_n)$, где n = 0, 1, 2,…, x_0 – произвольная точка из X, $x_{n+1} = f(x_n)$.

На принципе сжимающих отображений основан метод последовательных приближений (метод итераций) решения уравнения $x = f(x)$. Суть метода заключа-

ется в построении последовательности $\{x_n\}$, сходящейся к искомому решению x^*. Для элементов x_n и x^* справедливо неравенство:

$$\rho(x_n, x^*) \le \frac{\alpha^n}{1-\alpha}\rho(x_0, x_1). \qquad (2.6)$$

Из неравенства (2.6) следует, что если необходимо найти приближенное значение x^* с точностью $\varepsilon > 0$, то достаточно найти минимальный номер n, для которого выполняется неравенство $\frac{\alpha^n}{1-\alpha}\rho(x_0, x_1) < \varepsilon$.

Рассмотрим систему нелинейных уравнений

$$\begin{cases} F_1(L_1, L_2, ..., L_n) = 0 \\ F_2(L_1, L_2, ..., L_n) = 0 \\ \dots \\ F_n(L_1, L_2, ..., L_n) = 0. \end{cases} \qquad (2.7)$$

Данную систему можно привести к виду:

$$\begin{cases} L_1 = \varphi_1(L_1, L_2, ..., L_n) \\ L_2 = \varphi_2(L_1, L_2, ..., L_n) \\ \dots \\ L_n = \varphi_n(L_1, L_2, ..., L_n). \end{cases} \qquad (2.8)$$

Систему (2.8) 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 φ_i и $\frac{\partial \varphi_i}{\partial L_j}$ ($i = 1, 2, \dots, n$; $j = 1, 2, \dots, n$) определены и непрерывны в некоторой области $G \subset R^n$, D – замкнутое ограниченное выпуклое множество, содержащееся в области G, причем $\varphi(D) \subset D$.

а) Рассмотрим в пространстве R^n метрику $\rho(\overline{L}, \overline{\overline{L}}) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (\overline{L_i} - \overline{\overline{L_i}})^2}$.

Используя теорему Лагранжа для функции нескольких переменных и неравенство Коши-Буняковского, для любых двух элементов $\overline{L}$ и $\overline{\overline{L}}$ из D получаем

$$\rho(\varphi(\overline{L}), \varphi(\overline{\overline{L}})) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (\varphi_i(\overline{L}) - \varphi_i(\overline{\overline{L}}))^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(\sum_{j=1}^{n} \frac{\partial \varphi_i(s^i)}{\partial L_j} (\overline{L_j} - \overline{\overline{L_j}})\right)^2} \le$$

$$\le \sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(\sum_{j=1}^{n}\left(\frac{\partial\varphi_i\left(s^i\right)}{\partial L_j}\right)^2\sum_{j=1}^{n}\left(\overline{L_j}-\overline{\overline{L_j}}\right)^2\right)} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(\sum_{j=1}^{n}\left(\frac{\partial\varphi_i\left(s^i\right)}{\partial L_j}\right)^2\rho^2\left(\overline{L},\overline{\overline{L}}\right)\right)} \le$$

$$\le \sqrt{\sum_{i=1}^{n}\max_{L\in D}\sum_{j=1}^{n}\left(\frac{\partial\varphi_i}{\partial L_j}\right)^2}\,\rho\left(\overline{L},\overline{\overline{L}}\right).$$

Следовательно, при выполнении условия

$$\alpha_1 = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}\max_{L\in D}\sum_{j=1}^{n}\left(\frac{\partial\varphi_i}{\partial L_j}\right)^2} < 1 \qquad (2.9)$$

отображение φ является сжимающим в D, а значит, система (2.8) имеет в D единственное решение, которое может быть найдено методом последовательных приближений.

б) Рассмотрим в пространстве R^n метрику $\rho(\overline{L},\overline{\overline{L}}) = \sum_{i=1}^{n}\left|\overline{L_i}-\overline{\overline{L_i}}\right|$.

В силу теоремы Лагранжа для любых двух элементов $\overline{L}$ и $\overline{\overline{L}}$ из D имеем

$$\rho(\varphi(\overline{L}),\varphi(\overline{\overline{L}})) = \sum_{i=1}^{n}\left|(\varphi_i(\overline{L})-\varphi_i(\overline{\overline{L}})\right| = \sum_{i=1}^{n}\left|\sum_{j=1}^{n}\frac{\partial\varphi_i(s^i)}{\partial L_j}(\overline{L_j}-\overline{\overline{L_j}})\right| \le$$

$$\le \sum_{i=1}^{n}\left(\sum_{j=1}^{n}\left|\frac{\partial\varphi_i(s^i)}{\partial L_j}\right|\left|(\overline{L_j}-\overline{\overline{L_j}})\right|\right) \le \sum_{i=1}^{n}\max_{1\le j\le n}\max_{L\in D}\left|\frac{\partial\varphi_i}{\partial L_i}\right|\rho\left(\overline{L},\overline{\overline{L}}\right).$$

Следовательно, при выполнении условия

$$\alpha_2 = \sum_{i=1}^{n}\max_{1\le j\le n}\max_{L\in D}\left|\frac{\partial\varphi_i}{\partial L_j}\right| < 1 \qquad (2.10)$$

отображение φ является сжимающим в D, а значит, система (2.8) имеет в D единственное решение, которое может быть найдено методом последовательных приближений.

в) Рассмотрим в пространстве R^n метрику $\rho(\overline{L},\overline{\overline{L}}) = \max_{1\le i\le n}\left|\overline{L_i}-\overline{\overline{L_i}}\right|$.

В силу теоремы Лагранжа для каждого i и для любых двух элементов $\overline{L}$ и $\overline{\overline{L}}$ из D имеем

$$\left|\varphi_i\left(\overline{L}\right)-\varphi_i\left(\overline{\overline{L}}\right)\right| = \left|\sum_{j=1}^{n}\frac{\partial\varphi_i\left(s^i\right)}{\partial L_j}\left(\overline{L_j}-\overline{\overline{L_j}}\right)\right| \le \left(\max_{1\le j\le n}\left|\overline{L_j}-\overline{\overline{L_j}}\right|\right)\sum_{j=1}^{n}\left|\frac{\partial\varphi_i\left(s^i\right)}{\partial L_j}\right| = \sum_{j=1}^{n}\left|\frac{\partial\varphi_i\left(s^i\right)}{\partial L_j}\right|\rho\left(\overline{L},\overline{\overline{L}}\right),$$

а значит, $\rho\left(\varphi\left(\overline{L}\right),\varphi\left(\overline{\overline{L}}\right)\right)=\max\limits_{1\le i\le n}\left|\varphi_i\left(\overline{L}\right)-\varphi_i\left(\overline{\overline{L}}\right)\right|\le\max\limits_{1\le i\le n}\max\limits_{L\in D}\sum\limits_{j=1}^{n}\left|\frac{\partial\varphi_i}{\partial L_j}\right|\rho\left(\overline{L},\overline{\overline{L}}\right)$.

Следовательно, при выполнении условия

$$\alpha_3=\max_{1\le i\le n}\max_{L\in D}\sum_{j=1}^{n}\left|\frac{\partial\varphi_i}{\partial L_j}\right|<1 \qquad (2.11)$$

отображение φ является сжимающим в D, а значит, система (2.8) имеет в D единственное решение, которое может быть найдено методом последовательных приближений.

Таким образом, если для системы (2.8) выполняется хотя бы одно из условий $\alpha_1 < 1$, $\alpha_2 < 1$, $\alpha_3 < 1$, то данная система имеет в D единственное решение, которое можно с любой степенью точности найти методом итераций, выбирая в качестве $L^0=\left(L_1^0,L_2^0,\ldots,L_n^0\right)$ произвольный элемент из D и полагая $L^k=\left(L_1^k,L_2^k,\ldots,L_n^k\right)=\varphi\left(L^{k-1}\right)=\varphi\left(L_1^{k-1},L_2^{k-1},\ldots,L_n^{k-1}\right)$ для k = 1, 2, …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 (2.4). Остальные уравнения выступают в качестве нелинейных ограничений для целевой функции.

В жилых многоэтажных зданиях системы вытяжной естественной вентиляции выполняются из унифицированных по высоте здания поэтажных блоков. Таким образом, геометрические характеристики всех элементов системы, в том числе площади сечений сборного и бокового каналов (a_j и b_j), по всей высоте здания остаются постоянными. Нелинейность эмпирических зависимостей при определении коэффициентов местных сопротивлений уравнений ξ_j (например, формулы (1.64) и (1.65)) и неизменность значений $F_с$, $F_п$, $F_б$ по высоте здания аналитически подтверждают невозможность обеспечения удаления равных объемов воздуха по этажам при любых параметрах наружного воздуха (при отсутствии регулирующих устройств в вытяжных решетках).

Результаты аналитического определения фактической производительности вытяжной естественной вентиляции представлены в разделе 2.3.

2.2. Натурные исследования естественной вентиляции типового жилого дома

2.2.1. Задачи и методика проведения исследования

Натурные исследования проводились с целью:

– проверки достоверности физико-математической модели;

– определения фактических воздухообменов при различных параметрах наружного воздуха;

– выявления значений неравномерности воздухообменов по этажам.

Натурные замеры фактических воздухообменов в квартирах проводились в диапазоне температур наружного воздуха от + 5 °С до – 5 °С [248]. Естественное проветривание помещений (за счет открывания части оконного проема) при данных параметрах наружного воздуха не рекомендуется, поэтому измерения проводились при полностью закрытых оконных проемах.

Объект исследования – типовое жилое девятиэтажное крупнопанельное здание, секционного типа (серия 90). Замеры проводились в средних секциях. Каждая секция имеет по четыре квартиры на этаже: две трехкомнатные (зал 17 м^2; две спальни 12,5 м^2, 14,5 м^2; кухня 7,9 м^2; санузел раздельный); двухкомнатная (зал 17 м^2; спальня 12 м^2; кухня 10,2 м^2; санузел раздельный); однокомнатная (зал 17 м^2; кухня 8,9 м^2; санузел совмещенный). Высота помещений квартир 2,5 м. Отметка подвала составляет – 2,4 м. Здание имеет теплый чердак высотой 1,6 м.

Вытяжная система вентиляции в здании канальная с естественным побуждением. Удаление воздуха осуществляется из кухонь и санитарных узлов через индивидуальные вытяжные каналы сечением 115х170 мм, расположенные в вентиляционных блоках. Вентиляционные решетки имеют размер 120х200 мм. Трехкомнатные квартиры имеют по две системы вентиляции (из санузлов и кухонь), которые монтируются из вентиляционных блоков 9ВБ52. В двухкомнатных и однокомнатных квартирах вытяжка осуществляется с помощью одной «сдвоенной» системы из блоков 9ВБ50-2 и 9ВБ50, соответственно. Приток воздуха в помещения неорганизованный, через неплотности наружных ограждений и оконные блоки.

Вентиляционные блоки в пределах теплого чердака оборудованы вентиля-

ционными оголовками ВТ1 над кухнями двухкомнатных и однокомнатных квартир, ВТ2 над остальными системами. Выпуск воздуха из вентиляционного оголовка осуществляется в пределы чердака. Оголовки имеют высоту 600 мм и выполнены в форме диффузора. Для каждого вытяжного канала верхнего этажа в оголовке предусмотрен индивидуальный диффузор с изменение сечения от 115х170 мм до 115х320 мм. Для прохода вытяжного воздуха из нижележащих этажей в вентиляционном оголовке предусмотрен общий канал, выполненный также в форме диффузора.

Пространство теплого чердака является сборной камерой от всех вытяжных систем жилой секции. Выброс воздуха за пределы чердака осуществляется через одну общую на каждую секцию вытяжную шахту сечением 1100х1200 мм и высотой от верха перекрытия верхнего этажа до среза устья 4,6 м. Для уменьшения сопротивления шахта выполняется без защитного зонта с водосборным поддоном из металлического листа. Размеры поддона на 150 мм больше размеров шахты; глубина поддона – 150…300 мм [248].

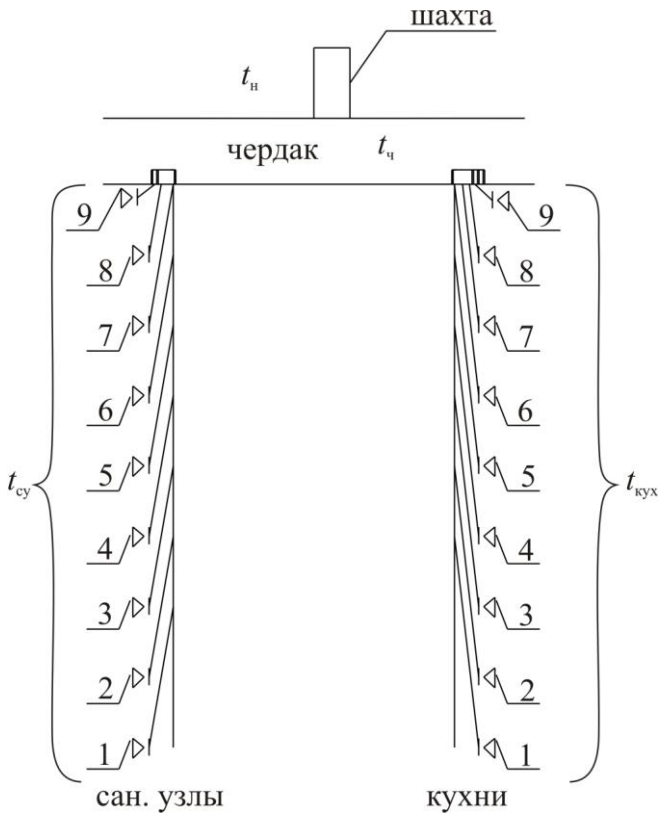


Рисунок 2.3 – Места замеров температур и скоростей воздуха, проходящего через вытяжную вентиляционную решетку, 1–9 – точки измерений

В процессе натурных исследований проводились следующие замеры: температуры наружного воздуха $t_н$, ºС, внутреннего воздуха $t_в$, ºС, и в области чердака $t_ч$, ºС, скорости движения воздуха $v_{реш}$, м/с, проходящего через вентиляционные решетки. Места замеров температур и скоростей воздуха поэтажно в квартирах одной секции показаны на рисунке 2.3.

Температура воздуха измерялась с помощью ртутного стеклянного лабораторного термометра типа ТЛ-4 № 1 (пределы измерения от – 30 ºС до + 20 ºС), №2 (пределы измерения от 0 ºС до + 155 ºС), цена деления 0,1 ºС; класс точности 1. Температура внутреннего воздуха в помещениях кухни и санитарного узла измерялась в зоне 1,5 м от пола, термометр размещался на штативе.

Скорость потока воздуха в вентиляционных решетках измерялась анемометром цифровым переносным АП1М (рисунок 2.4). Основные технические характеристики: диапазон измерения средней скорости направленного воздушного потока от 0,3 до 5 м/с; класс точности 0,1; чувствительность не более 0,2 м/с; время измерения 5 с; время индикации 3 с. Измерение скорости воздуха проводилось непосредственно у вентиляционной решетки, поэтому анемометр был оснащен насадком, площадь выходного отверстия которого равнялась площади решетки. Для более плотного прилегания насадка к стене края насадка оснащены прокладкой.

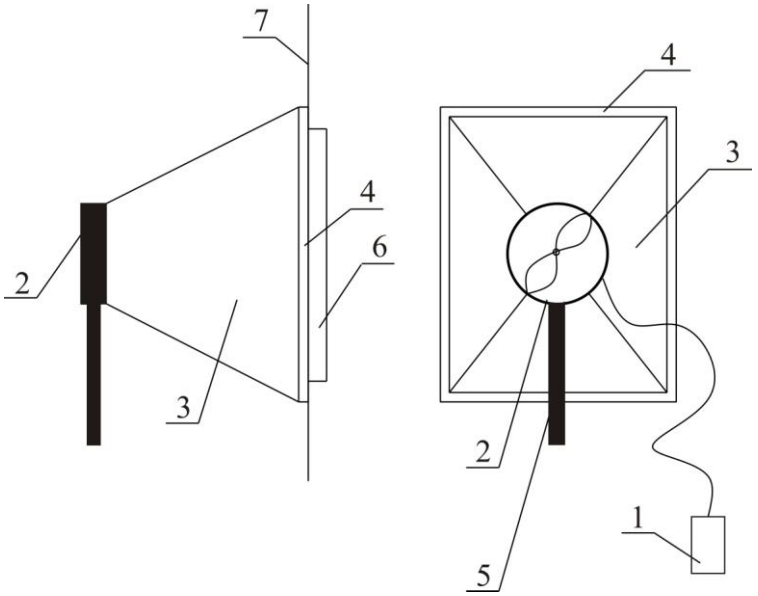


Рисунок 2.4 – Схема измерения скорости воздуха, проходящего через решетку с помощью анемометра: 1 – цифровой преобразователь анемометра; 2 – чувствительный элемент анемометра; 3 – насадок в виде диффузора; 4 – герметизирующая прокладка; 5 – ручка анемометра; 6 – вытяжная вентиляционная решетка; 7 – внутренняя поверхность стены

Все измерения температур и расходов воздуха проводились при закрытых окнах, форточках, при закрытых дверях в санитарных узлах, что наиболее соответствует условиям эксплуатации помещений данного назначения.

Планирование эксперимента сопровождалось оценкой точности измерений и возможных погрешностей. Систематическая погрешность приборов Δ_c состоит из основной погрешности Δ_1 и дополнительной. Дополнительная погрешность в свою очередь делится на: методическую, учитывающую влияние условий измерения на результаты замеров Δ_2; динамическую, при соблюдении временного интервала, необходимого для установления показаний, принимается равной нулю; и ошибки, вызванной влиянием окружающей среды Δ_3. Результаты расчета систематической ошибки для измерительных приборов, используемых в ходе исследования, приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Систематическая ошибка

Наименование измерительного прибора	Δ_1,%	Δ_2,%	Δ_3,%	Время установления показаний, с	Δ_c,%
Термометр лабораторный типа ТЛ-4	1,0	0,6	0,4	300	2,0
Анемометр цифровой переносной АП1М	0,1	0,08	0,06	10	0,24

Случайная погрешность измерений является составляющей погрешности измерения, изменяющейся случайным образом при повторных измерениях одной и той же величины. Абсолютная случайная погрешность:

$$\Delta_{\text{сл}} = \pm \frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta x_i}{n}, \tag{2.12}$$

где Δx_i – абсолютная погрешность отдельных измерений; n – количество измерений.

Абсолютная погрешность определяется выражением:

$$\Delta x = x - x_{\text{ист}}, \tag{2.13}$$

где x – значение, полученное при измерении; $x_{\text{ист}}$ – истинное значение измеряемой величины.

На практике истинное значение измеряемой величины неизвестно, вместо

него используется действительное значение, которое найдено экспериментально. Нами за такую величину приняты среднеарифметические значения замеренных величин. Для определения случайной погрешности были проведены предварительные замеры температуры воздуха внутри помещения и скорости потока воздуха в вентиляционной решетке. Случайная ошибка для термометра равняется $\Delta_{сл} = \pm 0{,}13$ ºС, для анемометра – $\Delta_{сл} = 0{,}13$ м/с.

Для получения эмпирических характеристик одномерной случайной величины необходимо определить оценки среднего значения $\bar{x}$, дисперсии s^2, и среднеквадратического отклонения s по формулам [264]:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n}; s^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2; \; s = \sqrt{s^2}. \qquad (2.14)$$

Оценка дисперсии является несмещенной, самостоятельной, и для нормальной совокупности она не является эффективной. Точечные оценки $\bar{x}$ и s^2 как случайные величины, характеризуются плотностью вероятности с определенными математическими ожиданиями и дисперсиями. В частности, известно, что $\bar{x}$ подчиняется нормальному закону распределения с математическим ожиданием M_x и дисперсией $\sigma_x^2 = \frac{\sigma_x^2}{n}$ (среднеквадратическая ошибка среднего арифметического в $\sqrt{n}$ раз меньше среднеквадратической ошибки единичного измерения). Можно сказать, что $\bar{x}$ является в $\sqrt{n}$ раз более точной оценкой *M(x),* чем единичное измерение x_i. Этот факт служит обоснованием необходимости проведения многократных измерений.

Количество проводимых измерений n зависит от точности δ, с которой необходимо решить поставленную задачу. Количественной оценкой точности является доверительный интервал $\pm\delta$ для определения действительного значения измеряемой величины (математического ожидания M_x). При заданной доверительной вероятности P и требуемой точности измерения δ, необходимое количество измерений можно определить заранее, при условии, что известно действительное

значение среднеквадратичного отклонения σ_x, а экспериментальные данные подчиняются нормальному закону распределения.

Количество измерений n, можно определить из выражения [264]:

$$n \geq z^2_{1-\frac{\alpha}{2}} \cdot \left(\frac{\sigma_x}{\delta}\right)^2 \geq z^2_{1-\frac{\alpha}{2}} \cdot (\varepsilon)^2, \qquad (2.15)$$

где $\varepsilon = \frac{\sigma_x}{\delta}$; $z_{1-\frac{\alpha}{2}}$ – квантиль нормированного нормального закона распределения порядка $P = 1 - \frac{\alpha}{2}$, определяемый по [264]; α – уровень значимости результата измерений, равный $\alpha = 1 - P$, где P – доверительная вероятность, наиболее часто принимаемая равной P = 0,95; σ_x – действительное значение среднеквадратичного отклонения; δ – половина ширины доверительного интервала, т.е. требуемая точность определения измеряемой величины.

На практике, как правило, число измерений не превышает 30 и, следовательно, значение фактической дисперсии σ_x^2 неизвестно, поэтому для расчетов используют исправленную дисперсию S_x^2.

В этом случае следует воспользоваться критерием Стьюдента и необходимое количество измерений определять из соотношения:

$$n \geq t^2_{\alpha,m} \cdot \left(\frac{S_x}{\delta}\right)^2 \geq t^2_{\alpha,m} \cdot (\varepsilon)^2, \qquad (2.16)$$

где $\varepsilon = \frac{S_x}{\delta}$; $t_{\alpha,m}$ – коэффициент Стьюдента (значение квантили статистики t порядка $P = 1 - \frac{\alpha}{2}$ для числа степеней свободы $m = n - 1$), определяемый по [264]; S_x – исправленное среднеквадратичное отклонение, определяемое по формуле:

$$S_x = +\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \overline{x_{\text{В}}}\right)^2}, \qquad (2.17)$$

где n – количество измерений; x_i – результат измерения i-ой величины; $\overline{x_{\text{В}}}$ – выборочное среднее арифметическое, определяемое по формуле:

$$\overline{x_{\text{В}}} = \sum_{i=1}^{n} x_i \Big/ n. \qquad (2.18)$$

Поскольку значение критерия Стьюдента $t_{\alpha,m}$ зависит не только от уровня значимости α, но и от числа степеней свободы m, в свою очередь зависящего от количества измерений, уравнение (2.16) необходимо решать методом последовательных приближений. В качестве начального приближения задается число измерений, рассчитанных по формуле (2.15).

Доверительный интервал для математического ожидания M_x случайной величины с нормальным законом распределения, построенным с доверительной вероятностью $P = 1 - \alpha$ при неизвестном значении фактической дисперсии σ_x^2 определяется из неравенства [264]:

$$\overline{x_{\text{В}}} - t_{\alpha,m} \cdot \frac{S_x}{\sqrt{n}} < M_x < \overline{x_{\text{В}}} + t_{\alpha,m} \cdot \frac{S_x}{\sqrt{n}}. \qquad (2.19)$$

Из (2.19) следует, что половина ширины доверительного интервала равна

$$\delta = t_{\alpha,m} \cdot \frac{S_x}{\sqrt{n}}. \qquad (2.20)$$

Распределение по закону Стьюдента справедливо только для величины x, распределенной нормально.

Для оценки отклонения эмпирического распределения от нормального вводятся специальные характеристики – асимметрия и эксцесс. В случае нормального распределения обе эти характеристики должны быть малы, о чем судят по сравнению с их среднеквадратичными погрешностями, равными:

для асимметрии $\sigma_{a_s} = \sqrt{\dfrac{6(n-1)}{(n+1)(n+3)}}$; (2.21)

для эксцесса $\sigma_{e_k} = \sqrt{\dfrac{24n(n-2)(n-3)}{(n-1)^2(n+3)(n+5)}}$, (2.22)

где n – объем выборки (количество измерений).

Если ни одна из указанных характеристик по абсолютному значению не превышает в 2…3 раза свою среднеквадратичную погрешность, вычисленную по

(2.21) и (2.22), то можно предположить близость этого распределения к нормальному [193].

Асимметрия эмпирического распределения определяется равенством

$$a_s = m_3 / \sigma_{\text{В}}^3 , \tag{2.23}$$

где m_3 – центральный эмпирический момент третьего порядка; $\sigma_{\text{В}}$ – выборочное среднеквадратичное отклонение.

Эксцесс эмпирического распределения определяется равенством:

$$e_k = m_4 / \sigma_{\text{В}}^4 - 3, \tag{2.24}$$

где m_4 – центральный эмпирический момент четвертого порядка.

Эмпирические моменты 3-го и 4-го порядков вычисляются методом произведений по формулам [77, 78]:

$$\begin{cases} m_3 = \left[M_3^* - 3M_1^* M_2^* + 2(M)^3\right] h^3; \\ m_4 = \left[M_4^* - 4M_1^* M_3^* + 6\left(M_1^*\right)^2 M_2^* - 3\left(M_1^*\right)^4\right] h^4, \end{cases} \tag{2.25}$$

где M_k^* – условный эмпирический момент порядка k, вычисленный для условных вариант:

$$M_k^* = \sum n_i u_i^k / n, \tag{2.26}$$

где n_i – частота варианты; $n = \sum n_i$ – объем выборки; u_i – условная варианта:

$$u_i = (x_i - C)/h, \tag{2.27}$$

где x_i – наблюдаемая варианта; C – ложный нуль (новое начало отсчета), в качестве которого принимается любая варианта, расположенная примерно в середине вариационного ряда, (часто такая варианта имеет наибольшую частоту); h – шаг, т.е. разность между двумя соседними вариантами.

Выборочное среднеквадратичное отклонение равно квадратному корню из выборочной дисперсии:

$$\sigma_{\text{В}} = \sqrt{D_{\text{В}}} . \tag{2.28}$$

Для вычисления выборочной дисперсии по условным моментам первого и второго порядков используется формула:

$$D_{\text{В}} = [M_2^* - (M_1^*)^2] h^2 . \tag{2.29}$$

Метод произведений предполагает вычисление условных моментов различных порядков вариационного ряда с равноотстоящими вариантами. На практике данные наблюдений не являются равноотстоящими числами, и требуется сведение первоначальных вариант к равноотстоящим. Для этого интервал, в котором заключены все наблюдаемые варианты, делится на несколько равных частичных интервалов, содержащих не менее 8…10 вариант. Затем находятся середины частичных интервалов, образующие собой последовательность равноотстоящих вариант. В качестве частоты каждой середины интервала принимается сумма частот вариант, попавших в соответствующий частичный интервал.

С целью уменьшения ошибки, вызванной группировкой, при вычислении выборочной дисперсии делают поправку Шеппарда:

$$D_{\text{в}}' = D_{\text{в}} - (1/12)h^2. \qquad (2.30)$$

В результате расчета по определению нормального распределения измеренных величин и необходимого и достаточного количества измерений получено, что необходимое количество измерений скорости воздушного потока n = 3, температуры воздуха – n = 5.

2.2.2. Анализ результатов натурных исследований систем вентиляции

При обработке результатов натурных замеров принимались конечные средние скорости воздуха в каждой из вытяжных решеток $v_{\text{ср}} = \sum v_{\text{реш}}/3$, м/с, и средние температуры воздуха $t_{\text{ср}} = \sum t/5$, °С. Расход воздуха L, м^3/ч, в каждой из вытяжных решеток площадью $F_{\text{р}}$, м^2, определялся по формуле:

$$L = F_{\text{р}} \cdot v_{\text{ср}} \cdot 3600. \qquad (2.31)$$

Конкретные значения замеров скоростей воздуха в вытяжных решетках санузлов и кухонь на каждом этаже экспериментального жилого девятиэтажного дома при температуре наружного воздуха $t_{\text{н}}$ = +5 ºС и расчетных значений объемов удаляемого воздуха $L_{\text{уд}}$, м^3/ч, из санузлов и кухонь сведены в таблице 2.2. В связи с тем, что в процессе натурных экспериментов проводился постоянный контроль положения окон и форточек (закрытое состояние), скорость ветра и, соот-

ветственно, ветровое давление имело минимальное влияние на воздухообмен и не учитывалось. Результаты аналогичных замеров скоростей и расчетов расходов удаляемого воздуха из санузлов и кухонь при других температурах наружного воздуха приведены в приложении 2. Графические результаты натурных исследований приведены на рисунках 2.5 и 2.6.

Одновременно с замерами расходов и температуры удаляемого воздуха из кухонь и санитарных узлов определялась температура воздуха в теплом чердаке, $t_ч$, °С. Результаты замеров приведены в таблице 2.3.

Проведенные натурные исследования показали, что температура воздуха в квартирах находилась в пределах нормы (от 22 ºС до 24,6 ºС), температура воздуха на чердаке $t_ч$ изменялась незначительно от 17,5 ºС при $t_н$ = +5 ºС до 16,4 °С при $t_н$ = –5 ºС.

В процессе проведения натурных исследований были выявлены случаи несоответствия фактического состояния систем проектным решениям: жильцами в некоторых квартирах были заменены вентиляционные вытяжные решетки; к входам в вентиляционные каналы были присоединены местные вытяжки от плит; в каналах устанавливались осевые вытяжные вентиляторы и т.п. Нами анализировались только экспериментальные данные, полученные в «чистых» вентиляционных стояках. За «чистые» принимались вентиляционные системы, которые в ходе эксплуатации остались без изменения и соответствовали проекту.

Полученные данные по объемам удаляемого воздуха через вентиляционные системы санузлов и кухонь показали, что фактический объем удаляемого воздуха практически всегда не соответствует нормируемому. При температуре наружного воздуха +5 ºС в санитарных узлах всех этажей фактический воздухообмен не соответствует норме. С понижением температуры наружного воздуха количество удаляемого воздуха увеличивается, норма наблюдается при температурах $t_н$ = +2 ºС и $t_н$ = –1 ºС на первом этаже, при $t_н$ = –5 ºС – на первом и третьем. В кухнях воздухообмен значительно стабильнее, однако при $t_н$ = +5 ºС норма наблюдалась на трех этажах, с понижением температуры нормативные объемы вытяжки были зафиксированы уже на шести этажах.

Таблица 2.2 – Результаты натурных исследований работы систем естественной вентиляции (условия замеров: $t_н$ = +5 ºС; $t_ч$ = +18,4 ºС; окна закрыты)

Параметры	Этаж								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
санузел									
$t_в$, ºС	23,4	22,6	24,4	24,1	22,4	22,9	24,6	24,0	23,4
	23,5	22,6	24,4	24,1	22,4	22,9	24,6	24,0	23,3
	23,5	22,6	24,4	24,1	22,4	22,8	24,6	24,0	23,4
	23,5	22,6	24,4	24,1	22,4	22,9	24,6	24,0	23,4
	23,5	22,6	24,3	24,1	22,4	22,9	24,5	24,0	23,4
$t_{ср}$, ºС	**23,5**	**22,6**	**24,4**	**24,1**	**22,4**	**22,9**	**24,6**	**24,0**	**23,4**
$v_{реш}$, м/с	0,2	0,18	0,19	0,14	0,16	0,13	0,17	0,13	0,15
	0,2	0,19	0,19	0,16	0,15	0,13	0,17	0,16	0,14
	0,2	0,2	0,19	0,12	0,17	0,16	0,17	0,16	0,15
$v_{ср}$, м/с	0,2	0,19	0,19	0,14	0,16	0,14	0,17	0,15	0,15
$L_{ср}$, м^3/ч	**45**	**43**	**43**	**31**	**35**	**32**	**39**	**35**	**33**
кухня									
$t_в$, ºС	22,9	22,0	23,7	22,7	21,6	22,1	23,9	23,4	22,7
	22,9	22,0	23,7	22,8	21,6	22,1	23,9	23,4	22,7
	22,8	22,0	23,7	22,8	21,6	22,1	23,9	23,4	22,7
	22,9	22,0	23,7	22,8	21,6	22,0	23,9	23,4	22,7
	22,9	22,0	23,8	22,8	21,6	22,1	23,8	23,4	22,8
$t_{ср}$, °С	**22,9**	**22,0**	**23,7**	**22,8**	**21,6**	**22,1**	**23,9**	**23,4**	**22,7**
$v_{реш}$, м/с	0,28	0,19	0,27	0,24	0,16	0,17	0,23	0,23	0,29
	0,3	0,21	0,27	0,27	0,17	0,19	0,22	0,23	0,29
	0,29	0,21	0,27	0,24	0,17	0,2	0,23	0,23	0,29
$v_{ср}$, м/с	0,29	0,2	0,27	0,25	0,17	0,19	0,23	0,23	0,29
$L_{ср}$, м^3/ч	**64**	**44**	**62**	**56**	**37**	**42**	**51**	**52**	**66**

Таблица 2.3 – Результаты измерений температуры воздуха в теплом чердаке $t_ч$, °С

№ изм.	Температура наружного воздуха $t_н$, ºС			
	–5	–1	2	5
1	19,2	18,6	18,2	17,7
2	19,2	18,6	18,2	17,7
3	19,1	18,6	18,3	17,7
4	19,2	18,7	18,2	17,7
5	19,2	18,6	18,2	17,7
$t_{ср}$, ºС	19,2	18,6	18,2	17,7

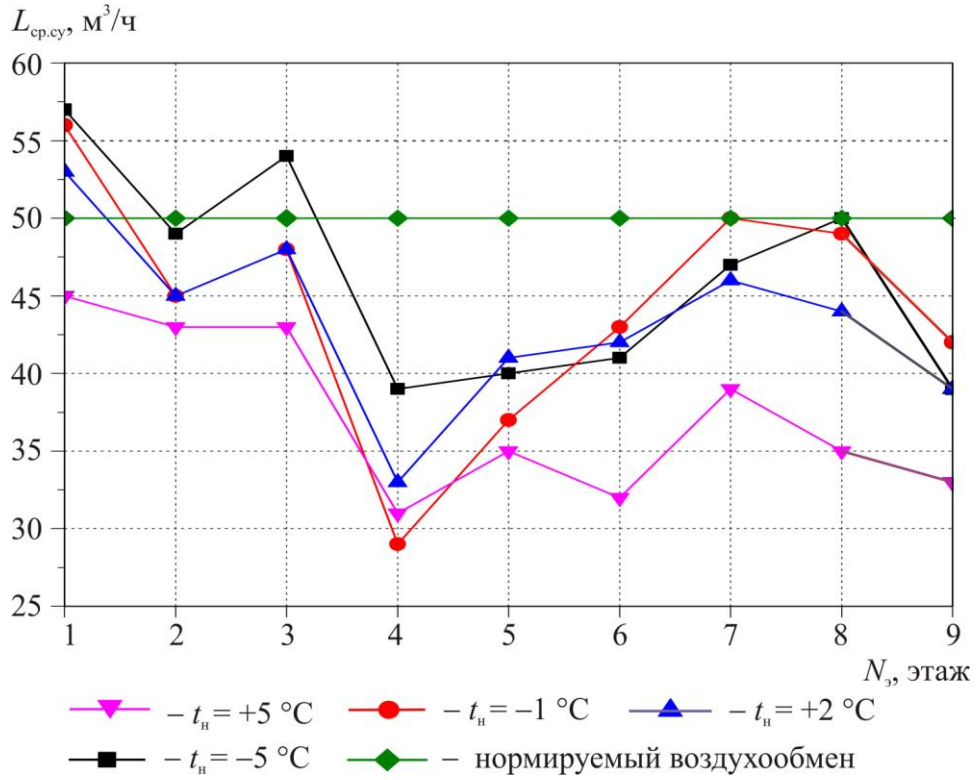


Рисунок 2.5 – Экспериментальные значения объемов удаляемого воздуха из санитарных узлов

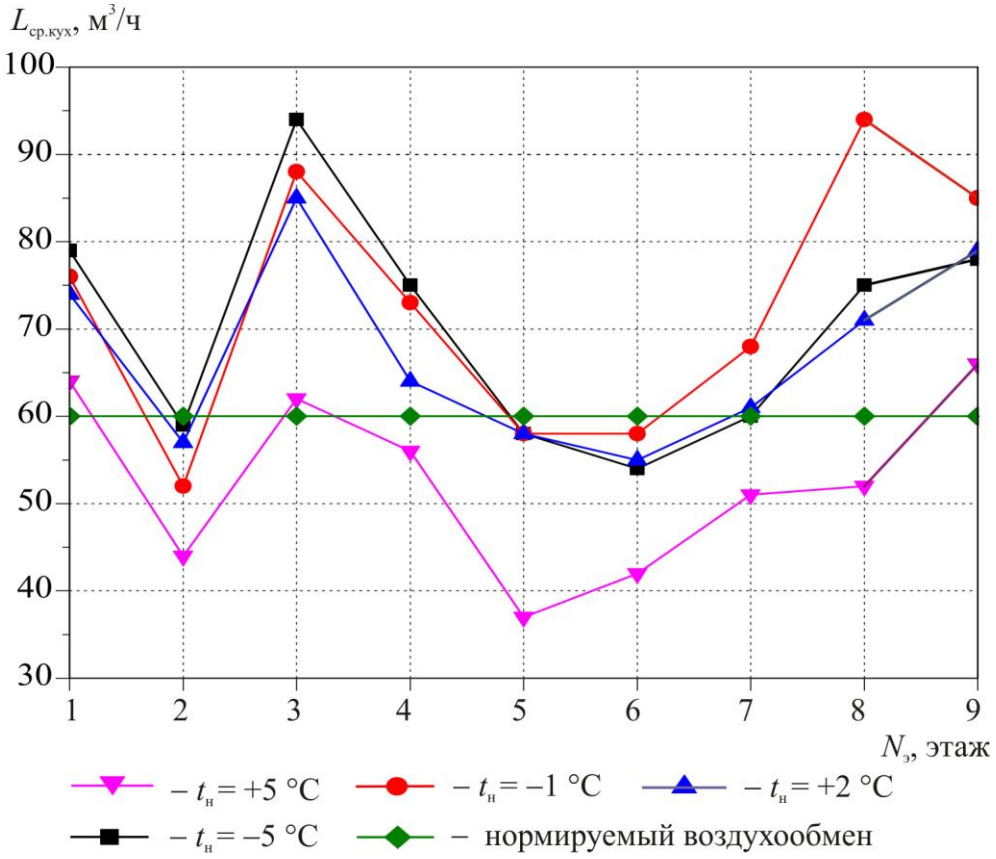


Рисунок 2.6 – Экспериментальные значения объемов удаляемого воздуха из кухонь

Дефицит удаляемого воздуха составляет 5…40 %. В ряде случаев расчетный воздухообмен соответствовал или превышал нормы расхода удаляемого воздуха, однако такие факты наблюдались только при отрицательной температуре наружного воздуха. При температуре наружного воздуха +5 ºС ни в одной из квартир не зафиксирован нормативный воздухообмен.

Следует также отметить наблюдавшуюся неравномерность расходов удаляемого воздуха по этажам. Неравномерность значительно превышала возможную погрешность при проведении натурных замеров.

2.3. Сопоставление результатов аналитических и натурных исследований

На основе разработанной физико-математической модели были проведены расчеты ожидаемых воздухообменов. Аналитические исследования проводились для той же системы естественной вытяжной вентиляции 9-этажного жилого дома, в которой проводились натурные исследования. За расчетные приняты температуры наружного воздуха +5 °С…–5 °С, что соответствует условиям эксперимента. Температуры внутреннего воздуха для расчета систем вентиляции принимается в пределах допустимых параметров на основании результатов, полученных в ходе наблюдений: для кухонь $t_в$ = 22 °С; для санузлов $t_в$ = 23 °С.

Численные решения проводились с использованием функции «Поиск решения» программного пакета Microsoft Office Excel. Расчетные значения объемов удаляемого воздуха из кухонь при $t_н$ = +5 °С представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Объемы удаляемого воздуха из кухонь жилого здания

Расчетная величина	Ед. изм	Этаж								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
$L^{расч}$	м^3/ч	120	113	118	114	110	100	85	57	50
$L^{изм}$	м^3/ч	64	44	62	56	37	42	51	52	66
Отклонение	%	47	61	48	51	66	58	40	9	–32

Для оценки адекватности предложенной физико-математической модели нами было проведено сопоставление результатов экспериментальных и аналитических исследований. Графические зависимости экспериментальных и расчетных

значений расходов воздуха из кухонь и санитарных узлов при различных температурах наружного воздуха приведены на рисунках 2.7…2.14.

Расчетные объемы удаляемого из квартир воздуха в большинстве случаев превышают нормативные (60 м^3/ч – для кухонь, оборудованных электроплитами, и 50 м^3/ч – для санитарных узлов). При температуре наружного воздуха +5 ºС, принятой в нормативных документах для расчета систем естественной вентиляции в жилых зданиях, объемы удаляемого воздуха превышают нормативный в санитарных узлах на 20…140 %; в кухнях превышение составляет 28…100 % за исключением двух верхних этажей. На восьмом этаже недостаток воздухообмена составляет 8 %, на девятом 1,6 %.

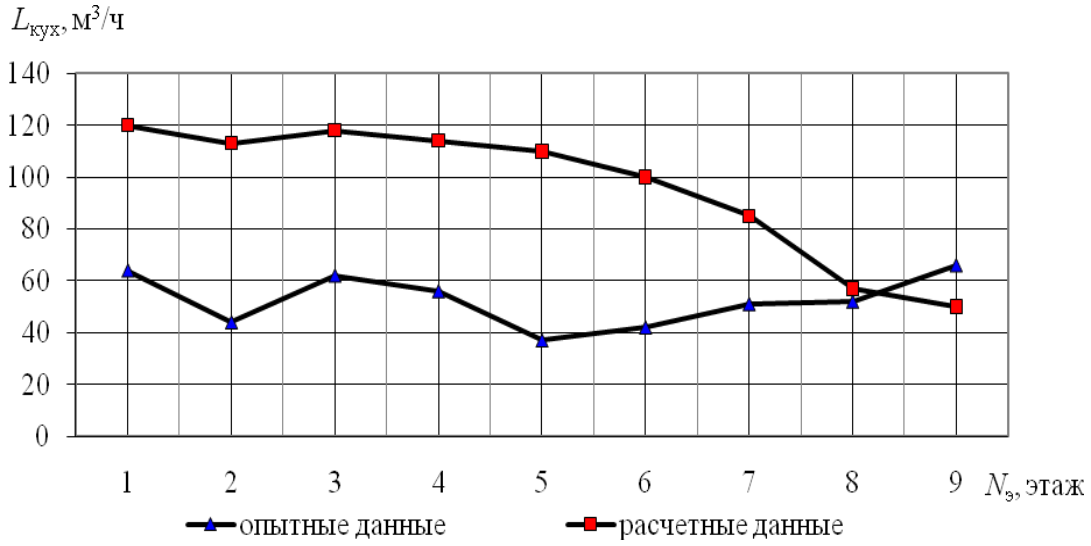


Рисунок 2.7 – Объемы удаляемого воздуха из кухонь при $t_н$ = +5 °С

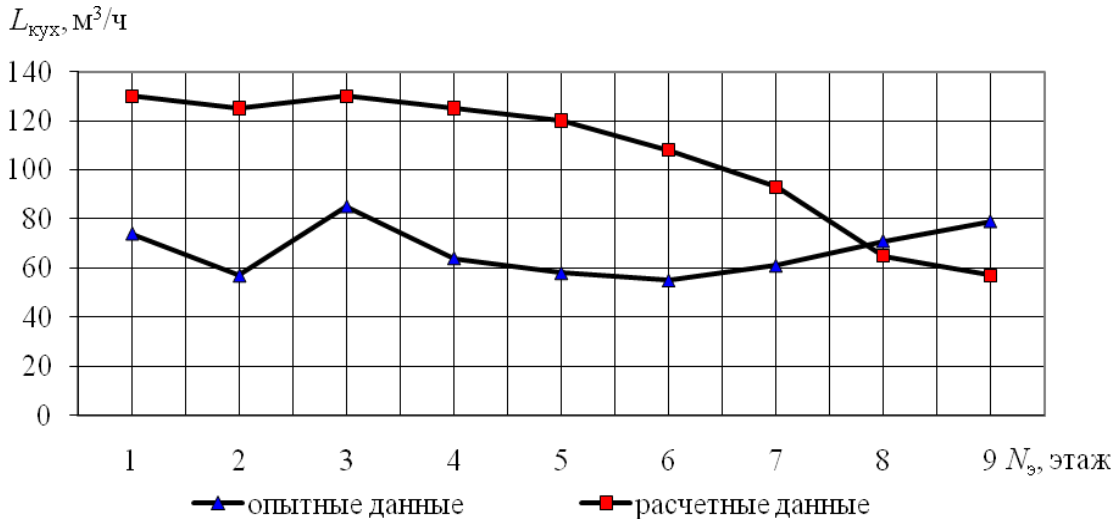


Рисунок 2.8 – Объемы удаляемого воздуха из кухонь при $t_н$ = +2 °С

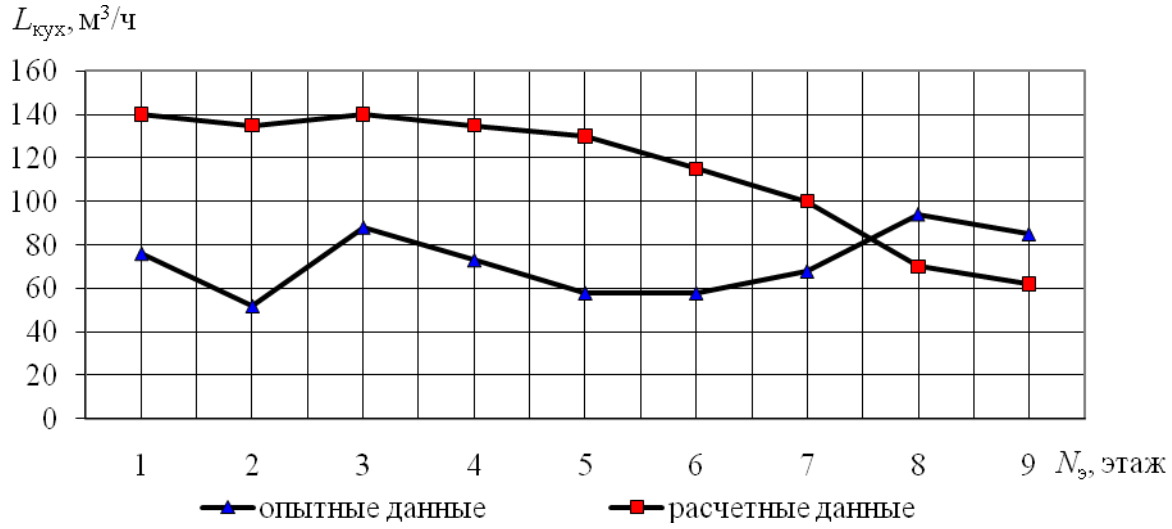


Рисунок 2.9 – Объемы удаляемого воздуха из кухонь при $t_н$ = –1 °С

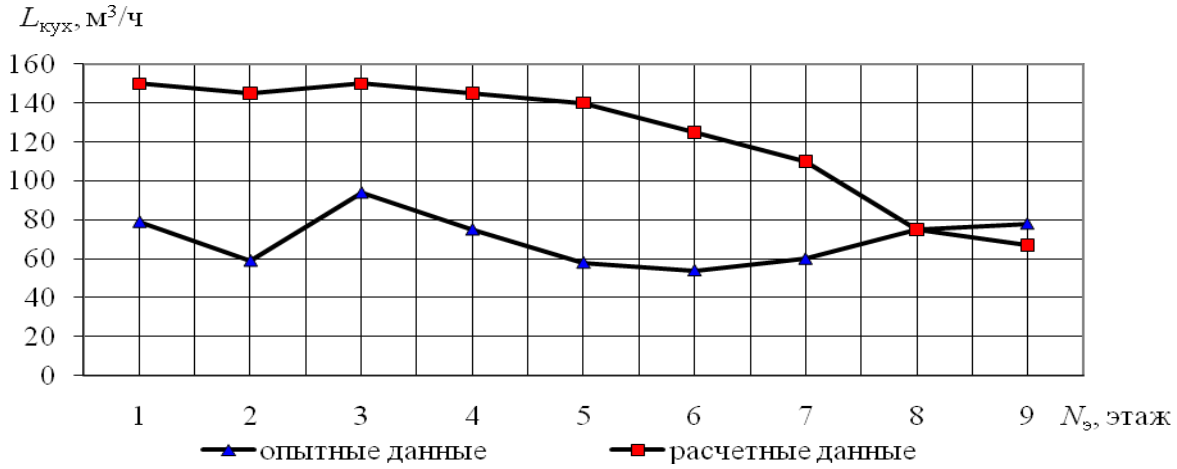


Рисунок 2.10 – Объемы удаляемого воздуха из кухонь при $t_н$ = –5 °С

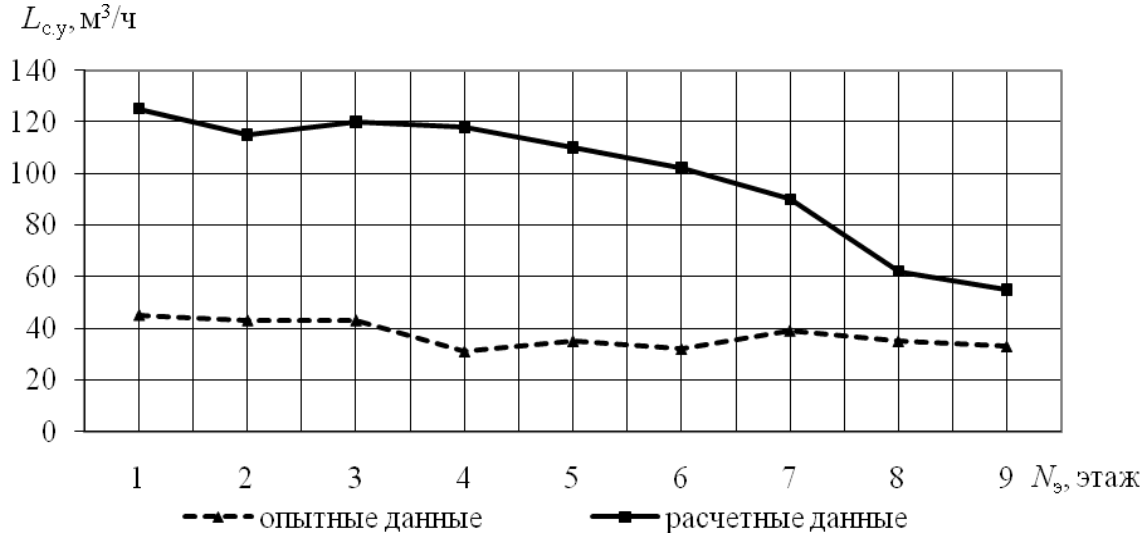


Рисунок 2.11 – Объемы удаляемого воздуха из санитарных узлов при $t_н$ = +5 °С

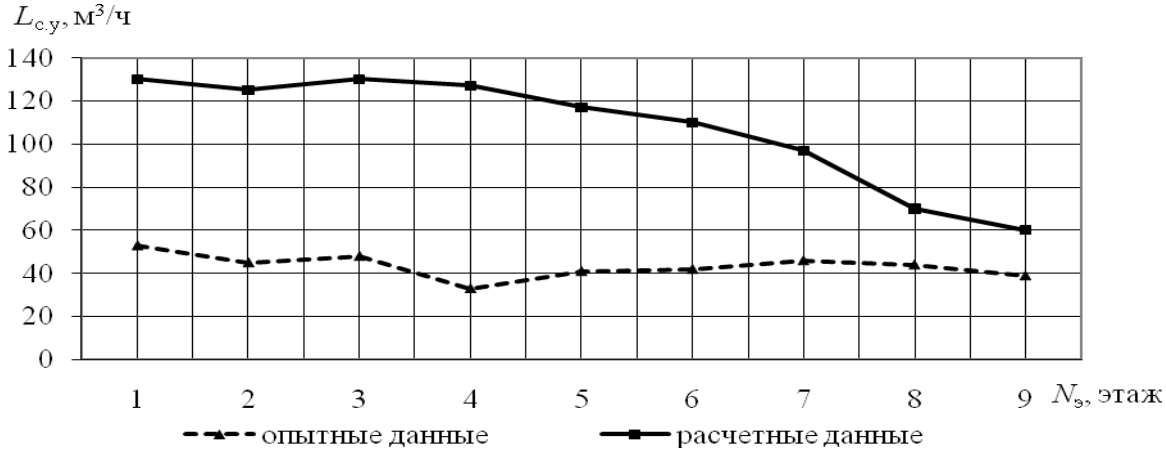


Рисунок 2.12 – Объемы удаляемого воздуха из санитарных узлов при $t_н$ = +2 °С

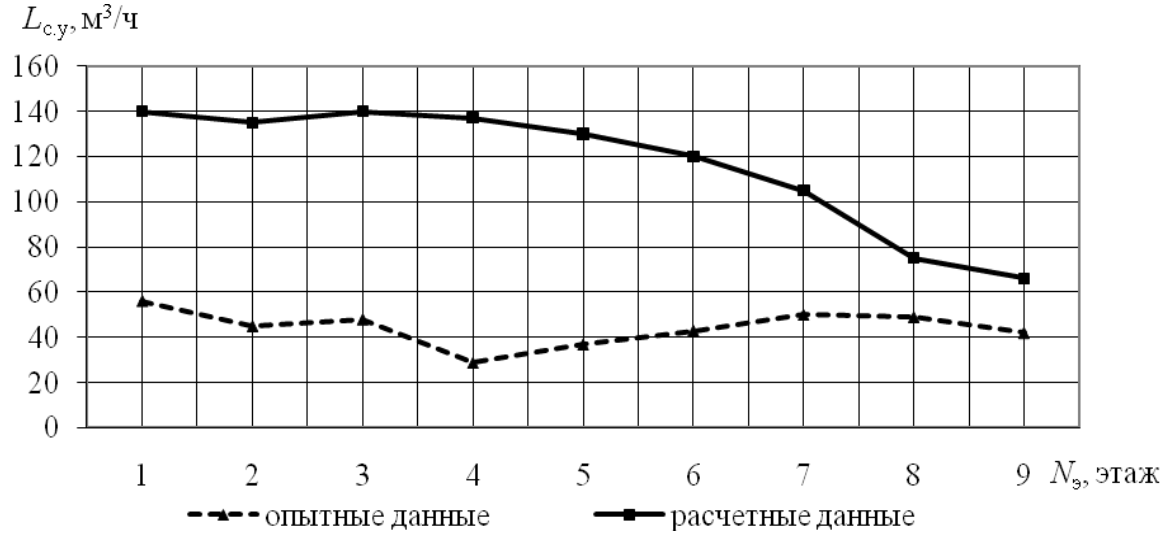


Рисунок 2.13 – Объемы удаляемого воздуха из санитарных узлов при $t_н$ = –1 °С

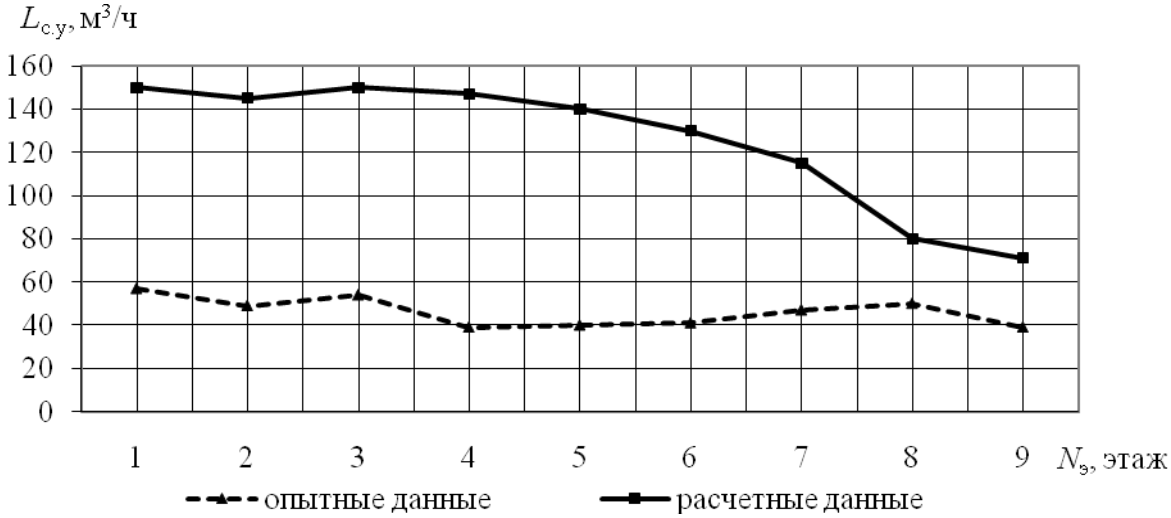


Рисунок 2.14 – Объемы удаляемого воздуха из санитарных узлов при $t_н$ = –5 °С

С понижением температуры наружного воздуха от +2 ºС до –5 ºС расчетный воздухообмен увеличивается за счет повышения располагаемого давления и превышает воздухообмен, предусмотренный нормами, на 6,5…190 %.

Сравнительный анализ расчетных и натурных данных величин воздухооб-

мена в жилых зданиях показал значительное расхождение исследуемых величин. Совпадение объемов удаляемого воздуха отмечается только в кухнях восьмого и девятого этажей при температуре наружного воздуха $t_н = –5$ ºС.

Особый интерес представляют данные, полученные при расчетной температуре наружного воздуха $t_н = +5$ ºС. На рисунке 2.7 приведены расчетные и натурные данные при этой температуре для кухонь, а на рисунке 2.11 для санитарных узлов. Нормируемый воздухообмен в натурных условиях был зафиксирован в кухнях в трех случаях: на первом, третьем и девятом этажах. На остальных этажах он ниже нормы. Однако согласно расчетам по существующим методикам на всех этажах, за исключением последних двух, должен наблюдаться воздухообмен, превышающий норму. Только на восьмом и девятом этажах имеется относительное совпадение опытных и расчетных результатов. Аналогичные или близкие результаты получены для санитарных узлов.

Помимо несоответствия расчетных и измеренных объемов удаляемого воздуха, следует отметить несовпадение хода кривых опытных и расчетных данных. Кривые, построенные по данным аэродинамического расчета, однотипны. Объемы воздуха первого и третьего этажа либо совпадают, либо отличаются незначительно. Небольшой спад в области второго этажа, наблюдается на всех графиках. Он вызван высоким сопротивлением тройника, за счет отсутствия эффекта эжектирования. Начиная с третьего этажа, объемы удаляемого воздуха постепенно снижаются. Это вызвано взаимной компенсацией уменьшения располагаемого давления и уменьшения сопротивления в тройниках вентиляционной системы. На верхнем этаже наблюдается диспропорция в снижении объемов удаляемого воздуха, что вызвано особенностями конструкции вентиляционной системы, а именно тем, что удаление воздуха из помещений верхнего этажа осуществляется через самостоятельный канал.

Однотипность графиков объемов удаляемого воздуха, построенных по опытным данным, прослеживается менее четко. Однако можно отметить некоторые общие черты. В отличие от расчетных данных опытные результаты для кухонь и санитарных узлов имеют принципиальные отличия. Это может быть вызвано сле-

дующими причинами: санузлы в отличие от кухонь эксплуатируются при закрытых дверях; кухни и санузлы имеет различный температурный режим; конструкции вентиляционных блоков различны, а именно, присоединение бокового канала к сборному каналу осуществляется через различное количество этажей.

В графиках, построенных по опытным данным, так же как и в графиках по расчетным данным наблюдается спад воздухообмена на втором этаже, а также постепенное уменьшение объемов удаляемого воздуха. Однако, в отличие от теоретических данных это уменьшение происходит не до восьмого этажа, а до четвертого в санузлах и до пятого в кухнях. В дальнейшем воздухообмен увеличивается до восьмого этажа, а на верхнем этаже опять происходит спад. Следовательно, вторая половина графика, построенного по результатам аэродинамических расчетов, противоречит действительным физическим процессам аэродинамики. Данное расхождение можно объяснить тем, что в аэродинамическом расчете не учитывается влияние инфильтрации (эксфильтрации) на работу вытяжной системы вентиляции.

При температуре наружного воздуха $t_н$ = +5 ºС в кухнях верхних этажей наблюдается полное наложение графиков. Однако этот единичный случай не может являться практическим подтверждением теоретических данных.

Таким образом, анализ данных, полученных в ходе аэродинамических расчетов, показал, что каналы, смонтированные из типовых вентиляционных блоков, имеют запас располагаемого давления и могут создавать устойчивую работу систем естественной вентиляции. Однако расчеты по существующим методикам противоречат результатам натурных испытаний. Помимо разницы в количестве удаляемого воздуха по расчетным и практическим данным имеется несогласование зависимости изменения объемов вытяжного воздуха по этажам. Несоответствие теоретических расчетов с практическими данными, по нашему мнению, вызвано методическими недоработками аэродинамического расчета систем вентиляции с естественным побуждением в зданиях с теплыми чердаками [163]. В связи с этим требуется совершенствование имеющейся методики расчета. Определение потерь давления в системах дает результаты достаточной степени точности. Возможной причиной несоот-

ветствия расчетных и фактических данных может являться определение располагаемого давления.

2.4. Уточнение методики аэродинамического расчета систем естественной вентиляции для зданий с теплыми чердаками

Приведенные в разделе 2.3 данные получены в результате аэродинамического расчета систем естественной вентиляции жилых зданий с теплыми чердаками, проведенного по общепринятой методике, изложенной в разделе 1.3.3. 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, по формуле (1.59).

Однако в действительности реальное располагаемое давление меньше полученного в ходе расчетов по данной методике. Этот факт объясняется тем, что теплый чердак, имеющий больший 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 (рисунок 2.15) [247].

Для раздельных систем общее располагаемое давление равно:

$$p_{\text{расп}} = H_1 \cdot \left(\frac{353}{273 + t_{\text{ч}}} - \frac{353}{273 + t_{\text{в}}} \right) \cdot g + H_2 \cdot \left(\frac{353}{273 + t_{\text{н}}} - \frac{353}{273 + t_{\text{ч}}} \right) \cdot g \,. \qquad (2.32)$$

Общее располагаемое давление определяется как сумма величин давлений для вентиляционных стояков (первый член в правой части уравнения 2.32) и общей вытяжной шахты (второй член). Принимаются следующие разности плотностей воздуха: для стояков – при температуре воздуха в пределах чердака $t_{\text{ч}}$ и температуре внутри помещения $t_{\text{в}}$; для шахты – при температуре наружного воздуха $t_{\text{н}}$ и температуре воздуха в теплом чердаке $t_{\text{ч}}$.

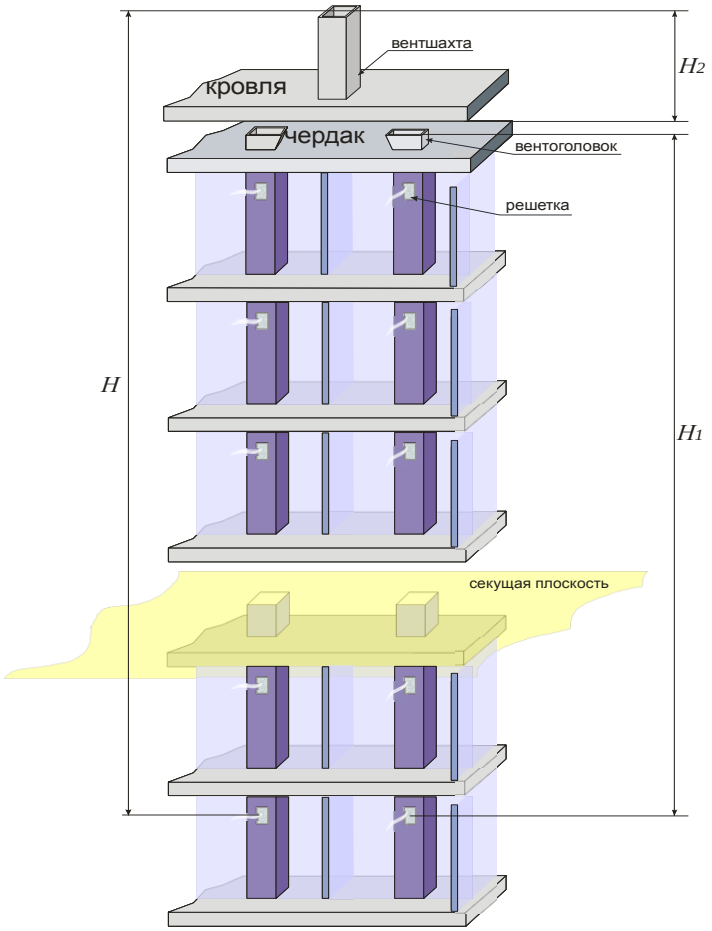


Рисунок 2.15 – Схема определения располагаемого давления в зданиях с теплыми чердаками

Температуру воздуха в пределах чердака можно определить из системы уравнений теплового и воздушного балансов [247]:

$$\begin{cases} 3{,}6 \cdot Q_{\text{пост}} - 3{,}6 \cdot Q_{\text{пот}} + \sum_{i=1}^{n} G_{\text{пр}} \cdot c_{в} \cdot t_{n} - \sum_{j=1}^{m} G_{\text{выт}} \cdot c_{в} \cdot t_{y} = 0; \\ \sum_{i=1}^{n} G_{\text{пр}} - \sum_{i=1}^{m} G_{\text{выт}} = 0, \end{cases} \tag{2.33}$$

где $Q_{\text{пост}}$, $Q_{\text{пот}}$ – соответственно, теплопоступления и теплопотери через ограждающие конструкции, Вт; $G_{\text{пр}}$, $G_{\text{выт}}$ – соответственно массовый расход приточного и вытяжного воздуха, кг/ч; t – температура поступающего либо удаляемого воздуха, ºС;

Во втором уравнении системы (2.33) массовые расходы воздуха равны:

$$G_{\text{ш}} = G_{\text{с.у}} + G_{\text{кух}}, \tag{2.34}$$

где $G_{\text{ш}}$ – количество воздуха, удаляемого через вентиляционную шахту, кг/ч;

$G_{с.у}$, $G_{кух}$ – количество воздуха, поступающего в чердачное помещение, соответственно, из санитарных узлов и кухонь, кг/ч.

В конечном виде уравнение для определения температуры воздуха теплого чердака принимает следующий вид:

$$t_ч = \frac{t_в \cdot k_{покр} \cdot F_{пер} + t_н \left(k_{ст} \cdot F_{ст} + k_{кров} \cdot F_{кров}\right) + 98\left(L_{с.у} + L_{кух} - 273 \cdot \frac{L_{с.у}}{273 + t_{с.у}} - 273 \cdot \frac{L_{кух}}{273 + t_{кух}}\right)}{98 \cdot \left(\frac{L_{с.у}}{273 + t_{с.у}} + \frac{L_{кух}}{273 + t_{кух}}\right) + k_{покр} \cdot F_{покр} + k_{ст} \cdot F_{ст} + k_{кров} \cdot F_{кров}}, \quad (2.35)$$

где $t_в$, $t_н$, $t_{с.у}$, $t_{кух}$ – температура воздуха, соответственно, внутри помещений квартир, наружного, в помещениях санитарных узлов, в кухнях, ºС; $k_{покр}$, $k_{ст}$, $k_{кров}$ – коэффициенты теплопередачи ограждающих конструкций соответственно покрытий верхних этажей, наружных стен, кровли теплого чердака, Вт/(м^2·ºС); $F_{покр}$, $F_{ст}$, $F_{кров}$ – площади поверхностей ограждающих конструкций соответственно перекрытий верхних этажей, наружных стен, кровли, м^2; $L_{с.у}$, $L_{кух}$ – объемы воздуха, поступающего в помещения чердаков соответственно из санитарных узлов и кухонь, м^3/ч; 98 – переходной коэффициент, Вт·ч/м^3.

Результаты расчета температуры воздуха в теплом чердаке $t_ч$, °С, по (2.35) показали, что существует прямопропорциональная зависимость температуры воздуха на чердаке от температуры наружного воздуха $t_н$, °С (рисунок 2.16).

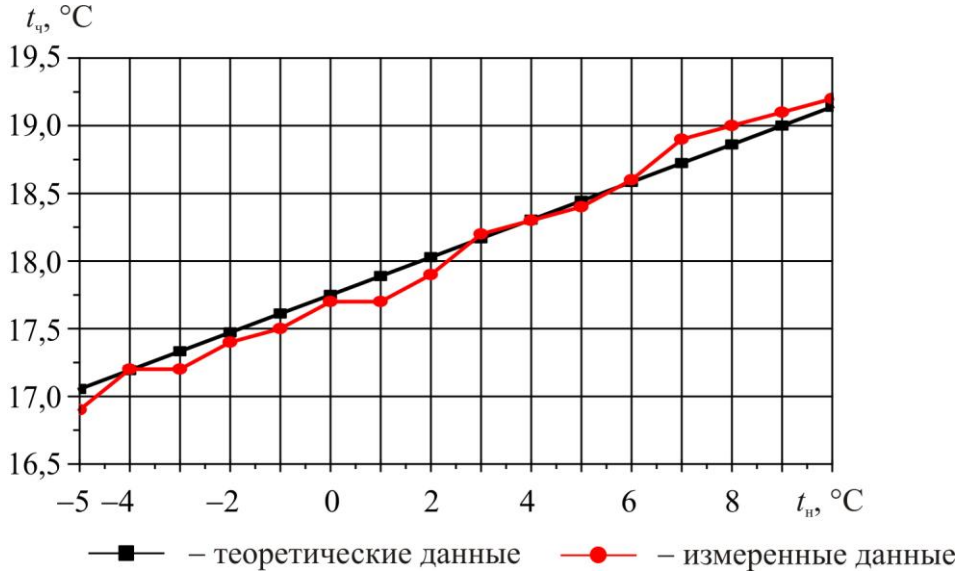


Рисунок 2.16 – Изменение температуры воздуха в теплом чердаке от температуры наружного воздуха

В ходе расчета температура воздуха в помещениях квартир принималась постоянной и составляла: в кухнях $t_{кух}$ = 22 ºС; в санитарных узлах $t_{с.у}$ = 23 ºС; в комнатах квартир $t_в$ = 20 ºС. Данные значения температур приняты, согласно [262], с учетом теплопоступлений от людей и бытового оборудования. Температура воздуха на чердаке от температуры наружного воздуха аппроксимируется для панельных типовых зданий в диапазоне температур наружного воздуха от –5 до +10 ºС линейно:

$$t_ч = 17{,}75 + 0{,}139 \cdot t_н. \qquad (2.36)$$

Имеется достаточная сходимость экспериментальных и теоретических результатов, невязка не превышает 5…7 %. Следовательно, формулы (2.36) может быть использована в качестве исходной для определения температуры воздуха на чердаке с достаточной для инженерных расчетов точностью в диапазоне температур наружного воздуха для расчета систем естественной вентиляции [247].

Результаты расчета температуры воздуха в пределах чердака в течение года представлены на рисунке 2.17. При расчетах принимались следующие значения температур: наружного воздуха – среднемесячная по СП [260]; внутреннего воздуха в холодный период года: для жилых помещений +20 °С, для санузлов +22 °С, для кухонь +18 °С [262]; внутреннего воздуха в теплый период – на 3 °С выше среднемесячной наружного воздуха.

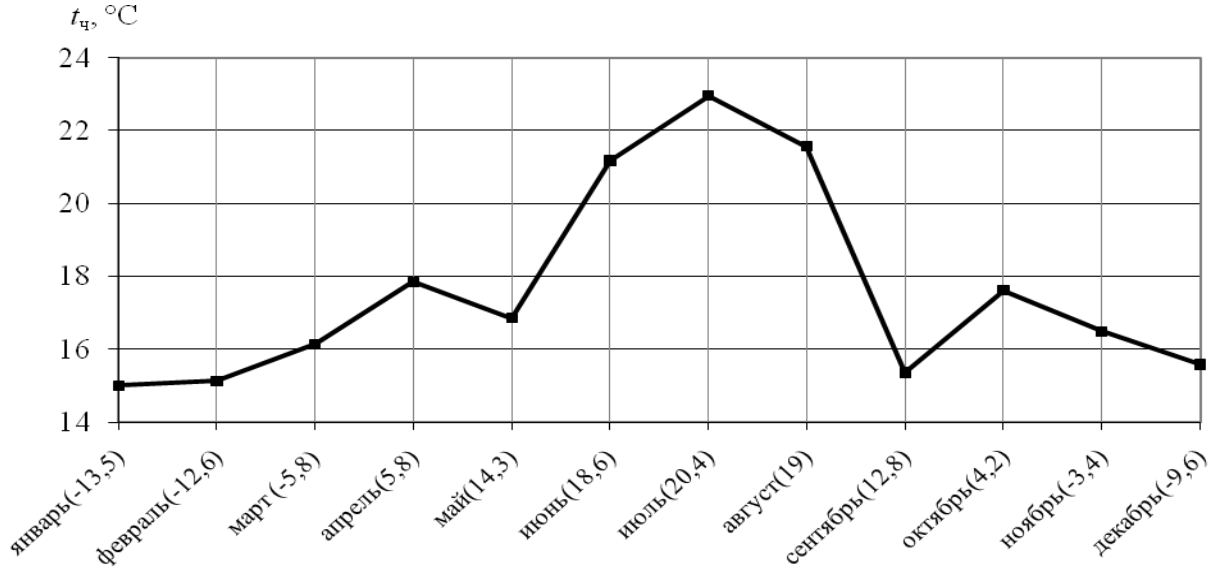


Рисунок 2.17 – Изменение температуры воздуха на чердаке в течение года

Анализируя график, приведенный на рисунке, можно заметить два случая резкого понижения температуры воздуха на чердаке, которое происходит в месяцы переходного периода. Это связано с отключением отопления в помещениях и, как следствие, понижением температуры поступающего на чердак воздуха из квартир [247].

С повышением температуры наружного воздуха увеличивается температура воздуха на чердаке и соответственно располагаемое давление падает. Наибольшую эффективность вентиляции следует ожидать при температуре воздуха в пределах чердака ниже 16 °С, когда располагаемое давление превышает потери давления в системе.

2.5. Анализ результатов расчета по уточненной методике

Расчет ожидаемых воздухообменов по уточненной методике был выполнен для условий, указанных в разделе 2.3. Графические результаты проведенных расчетов приведены на рисунках 2.18, 2.19. Как видно из приведенных графиков, данные, полученные в ходе расчетов, подтверждают выводы, полученные в разделе 2.3. Запас располагаемого давления при стандартном расчете значителен и изменяется в пределах от 35 % до 105 %.

При расчете по предложенной методике картина изменений потерь давления меняется. Совпадение данных наблюдается только для первого этажа, для которого располагаемое давление на преодоление сопротивления практически не затрачивается из-за особенности потерь давления в тройнике первого этажа. При одинаковых расходах в сборном и боковых сечениях тройника с малым углом присоединения коэффициент местного сопротивления становится отрицательным, т.е. возникает эффект эжектирования. В вышерасположенных этажах запас располагаемого давления значительно снижается. В санитарных узлах он положителен, что позволяет прогнозировать устойчивую работу систем вытяжной вентиляции. Однако, согласно опытным данным, особенный дефицит воздухообмена наблюдается в санузлах. Благоприятная картина, полученная в ходе расчета, может быть

вызвана тем, что расчет не учитывает замкнутость помещения (натурные измерения проводились при закрытых дверях).

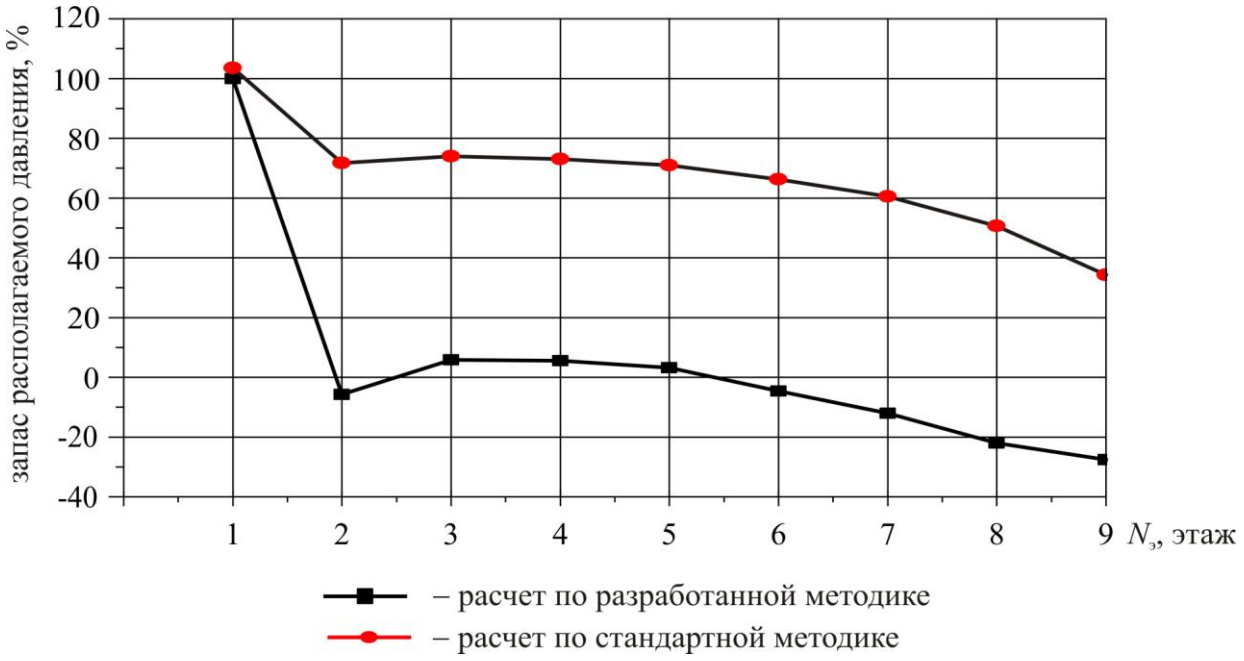


Рисунок 2.18 – График запаса располагаемого давления для кухонь

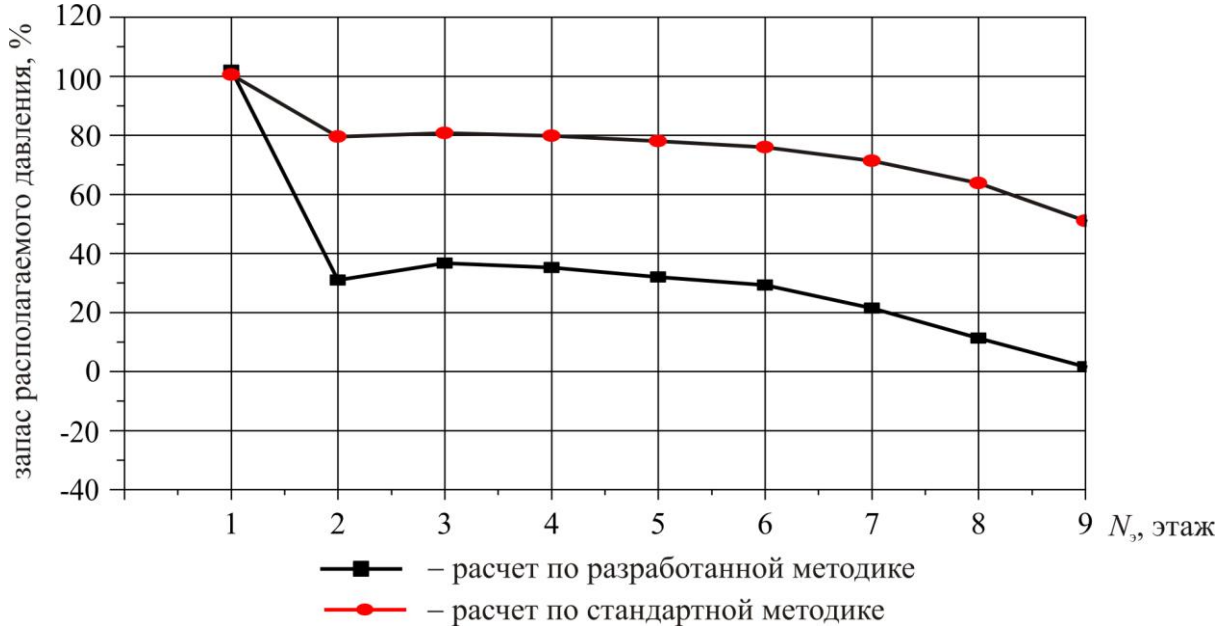


Рисунок 2.19 – График запаса располагаемого давления для санитарных узлов

В помещениях кухонь положительный запас располагаемого давления наблюдается только с третьего по пятый этаж. Для помещений санитарных узлов первоначально аэродинамический расчет проводился при условии открытых дверей в помещении. Однако функциональное назначение санузлов подразумевает

эксплуатацию с закрытыми дверями. В связи с этим вторым этапом был проведен расчет с учетом аэродинамического сопротивления дверного проема прохождению воздуха. Коэффициент местного сопротивления на вход воздуха в щелевое отверстие с одной торцевой стенкой (полом) был принят $\zeta = 0{,}58$, на выход воздуха из щелевого отверстия $\zeta = 2$ [108].

Результаты расчетов воздухообменов при температуре наружного воздуха $t_н$ = +5 ºС, +2 ºС, –1 ºС и –5 ºС приведены в виде графиков на рисунках 2.20…2.27.

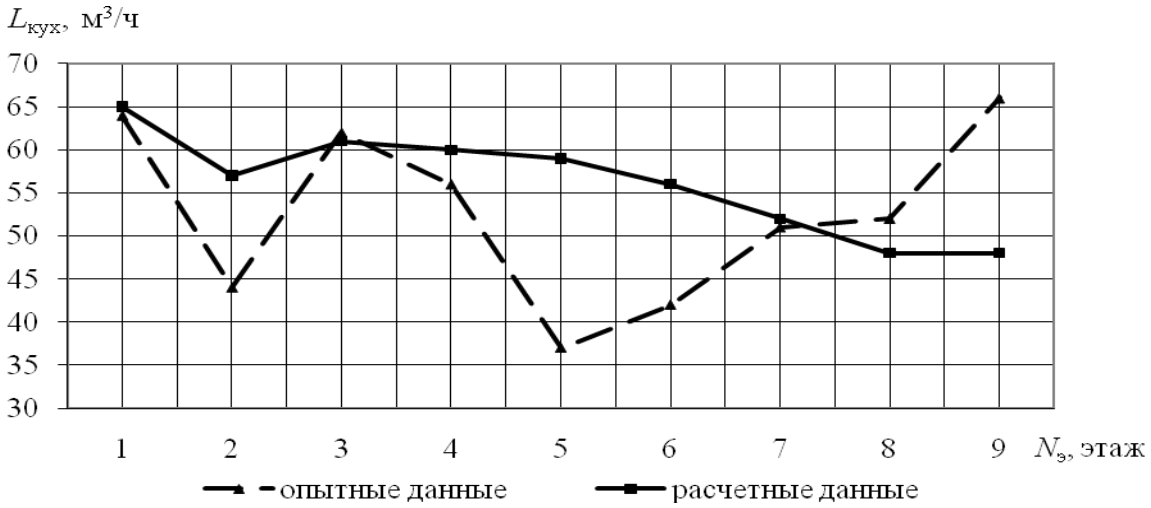


Рисунок 2.20 – Объемы удаляемого воздуха из кухонь при $t_н$ = +5º

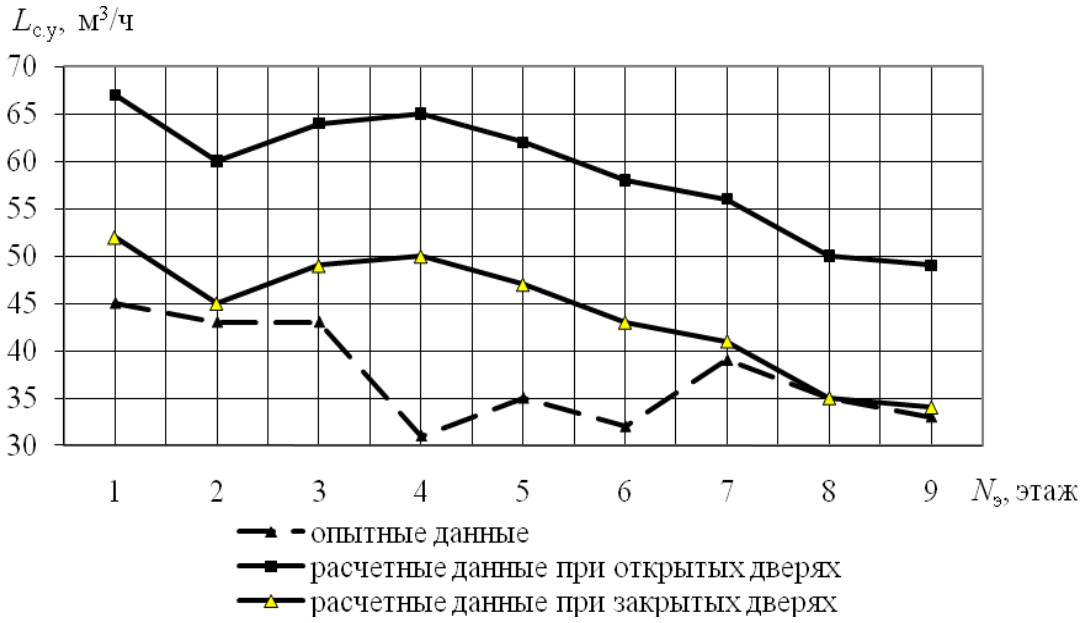


Рисунок 2.21 – Объемы удаляемого воздуха из санузлов при $t_н$ = +5 ºС

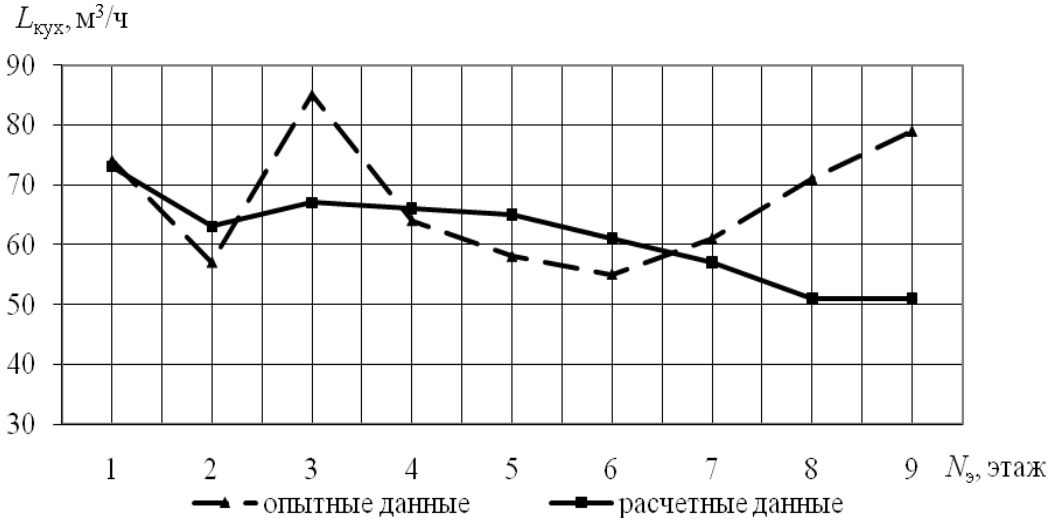


Рисунок 2.22 – Объемы удаляемого воздуха из кухонь при $t_н$ = +2 ºС

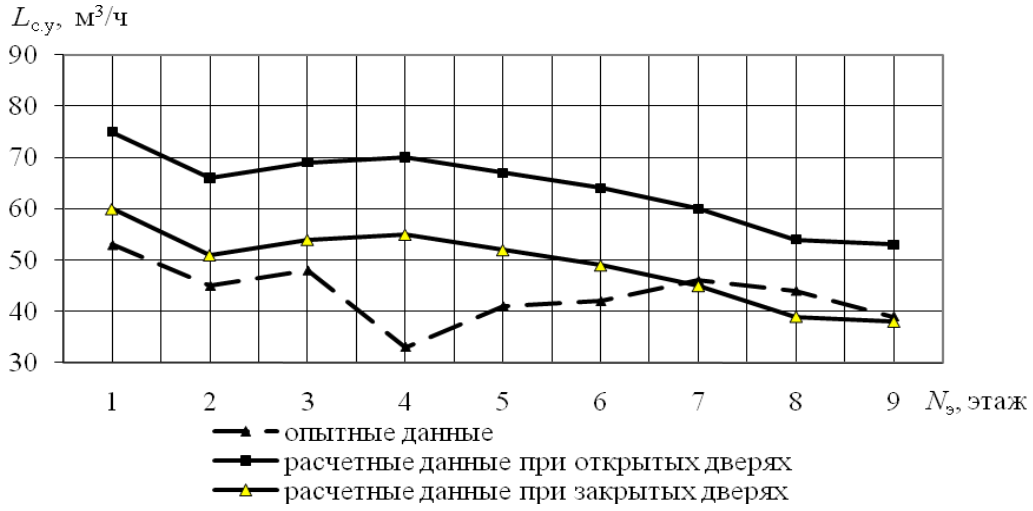


Рисунок 2.23 – Объемы удаляемого воздуха из санузлов при $t_н$ = +2 ºС

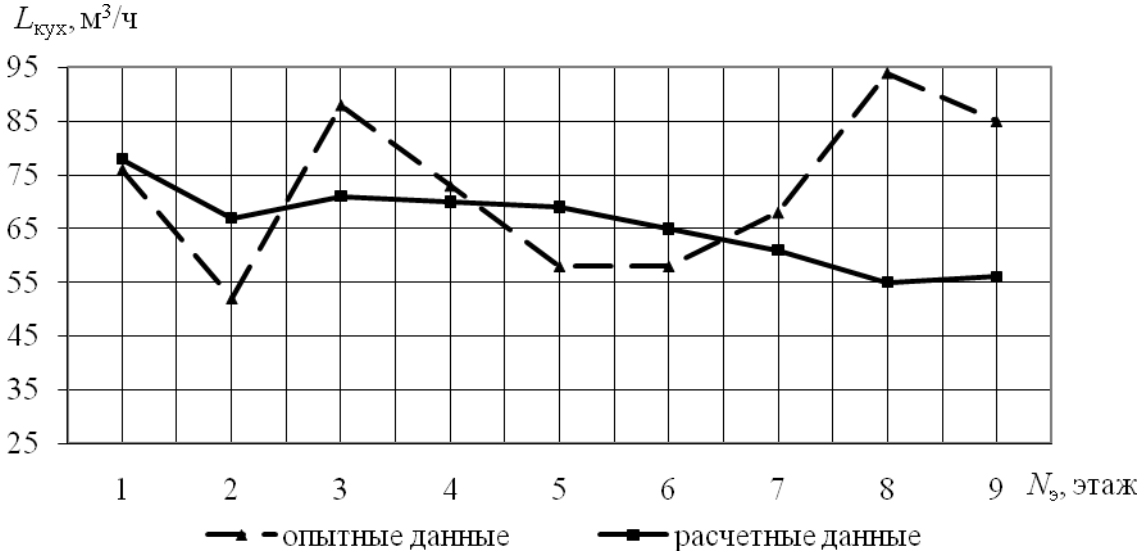


Рисунок 2.24 – Объемы удаляемого воздуха из кухонь при $t_н$ = –1 ºС

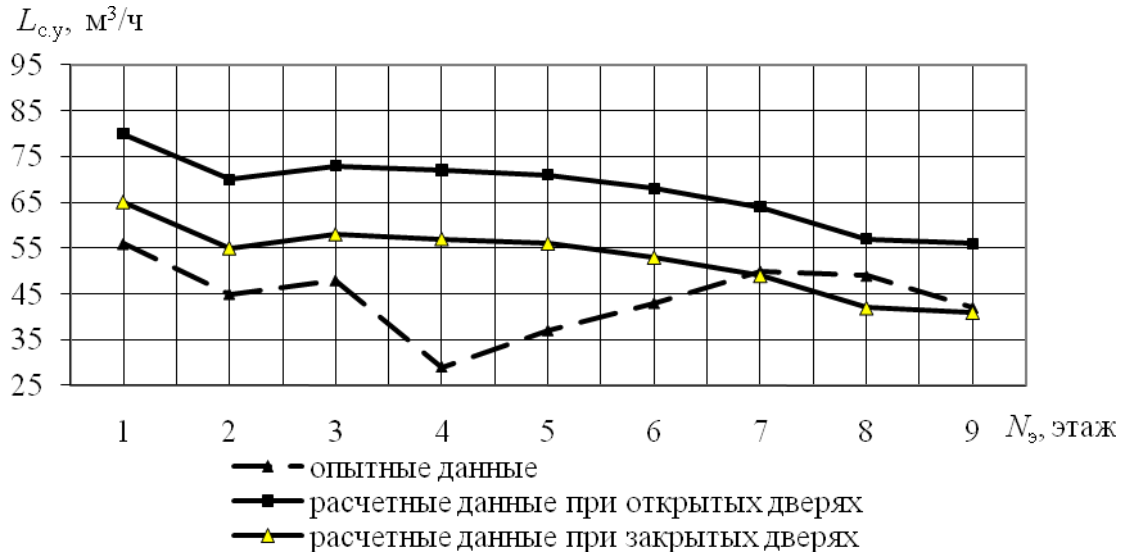


Рисунок 2.25 – Объемы удаляемого воздуха из санитарных узлов при $t_н$ = –1 ºС

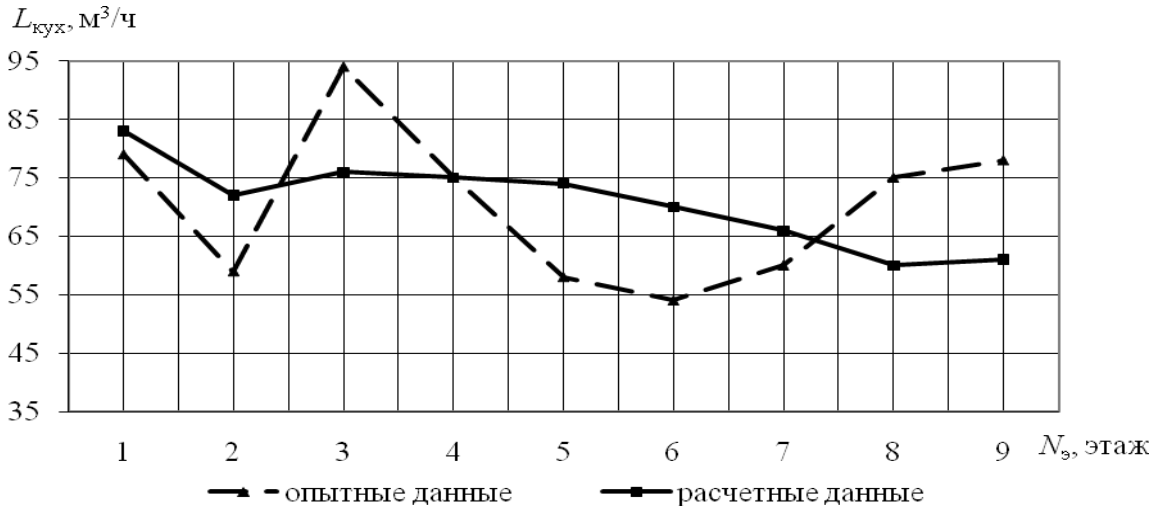


Рисунок 2.26 – Объемы удаляемого воздуха из кухонь при $t_н$ = –5 ºС

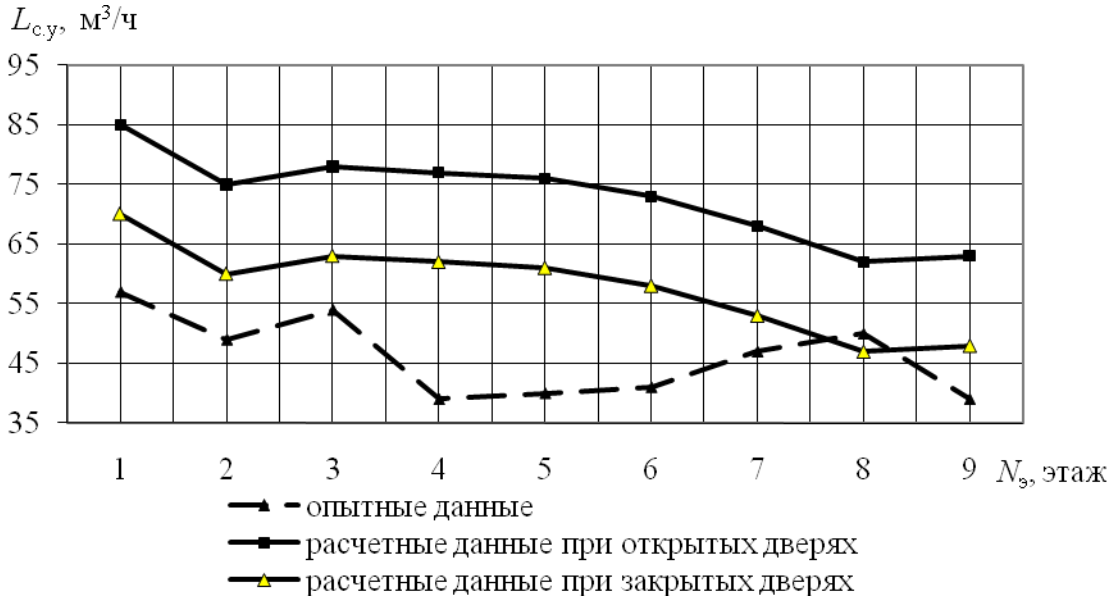


Рисунок 2.27 – Объемы удаляемого воздуха из санитарных узлов при $t_н$ = –5 ºС

Как видно из приведенных графиков, воздухообмен, рассчитанный по разработанной нами методике, находится в одном численном диапазоне с данными, полученными в ходе натурных измерений. При температуре наружного воздуха +5 ºС, на которою обычно проводится аэродинамический расчет, нормативный воздухообмен в кухнях (60 м^3/ч) наблюдается только на первом, третьем и четвертом этажах. В остальных случаях объемы удаляемого воздуха занижены по отношению к норме, дефицит составляет от 2 % до 25 %.

В санитарных узлах при расчете с открытыми дверями наблюдается воздухообмен выше нормы (50 м^3/ч). Исключение составляют объемы воздуха, удаляемого из санузлов восьмого и девятого этажей. На восьмом этаже расчетный воздухообмен соответствует норме, а на девятом он занижен.

При расчетах воздухообменов в санитарных узлах с учетом аэродинамических сопротивлений закрытых дверей наблюдается снижение объемов удаляемого воздуха на 12…15 м^3/ч. При данном снижении расчетные данные практически совпадают со значениями, полученными в ходе натурных измерений. Когда температура наружного воздуха $t_н$ = +5 ºС и двери закрыты, нормируемый воздухообмен в санитарных узлах зафиксирован только на первом и третьем этажах. Количество удаляемого воздуха меньше нормативного на 6…52 %.Понижение температуры наружного воздуха сопровождается увеличением располагаемого давления, что в свою очередь приводит к стабилизации работы систем естественной вытяжной вентиляции и к увеличению объемов удаляемого воздуха.

Расчетные величины воздухообменов находятся в одном числовом диапазоне с измеренными в экспериментах. Однако ход кривой, построенной по расчетным данным, не соответствует ходу экспериментальной кривой. Данное обстоятельство нами объясняется следующим образом. В методике аэродинамического расчета не учитывается динамика воздушного режима здания, влияние на работу систем вытяжной вентиляции инфильтрации (эксфильтрации) воздуха через неплотности ограждающих конструкций.

Для автоматизированного аэродинамического расчета по предложенной методика разработан алгоритм компьютерной программы. Блок-схема представлена в приложении 3.

2.6. Последствия нерасчетных режимов работы систем естественной вентиляции

Основными недостатками, выявленными в ходе натурных и аналитических исследований систем естественной вентиляции многоэтажных жилых зданий, являются неравномерность воздухообменов по этажам и нестабильность работы систем при изменениях параметров наружного воздуха.

Оба указанных недостатка, с точки зрения аналитического решения, являются следствиями единой задачи, которая представляет собой аэродинамическое условие работоспособности системы (раздел 2.1.2).

Значительное влияние на работу систем естественной вентиляции оказывает направление и скорость ветра [136].

Необходимо отметить влияние на работу систем естественной вентиляции воздухопроницаемости входных дверей в квартиру. В следствии неплотности дверей возникает перетекание отработанного воздуха из квартир нижних этажей по лестничной клетке в квартиры верхних этажей в результате чего приток свежего воздуха в них сокращается [136]. Для устранения данного явления необходимо предусматривать поэтажные коридоры, имеющие дверь, отделяющие лестнично-лифтовый узел от квартир. Однако в этом случае возможно горизонтальное перетекание воздуха с наветренной на заветренную сторону здания [191].

С понижением наружной температуры величина избыточного давления увеличивается, что теоретически улучшает работу системы. Согласно выполненным расчетам, для исследуемого 9-этажного здания с теплым чердаком при температуре –20 °С фактические расходы превышают нормируемые в 1,4 раза, а при –30 °С – 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 [266]. Сохранение теплового баланса квартиры в данном случае возможно либо за счет увеличения теплопоступлений от системы отопления, либо за счет снижения температуры внутреннего воздуха:

$$Q_{с.о} + Q_{быт} - Q_{огр} - Q_{инф} = 0, \qquad (2.37)$$

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

Для стабилизации работы системы вентиляции в целом, а также для обеспечения требуемых воздухообменов в квартирах в настоящее время многими авторами предлагается применение механической приточно-вытяжной вентиляции, в том числе и с устройствами для утилизации теплоты вытяжного воздуха. Данные разработки могут быть применены только в новостроящихся энергоэффективных зданиях и приводят к увеличению капитальных затрат.

Следует отметить, что установка осевых вентиляторов в вытяжные отверстия в каждой квартире приводит к перетеканию воздуха в другие квартиры по вентиляционному стояку.

Для решения указанных проблем в существующих жилых зданиях массовой застройки наиболее экономичным является применение естественно-механической системы вытяжной вентиляции [18, 92, 185, 186, 187, 286]. Наиболее приемлемым является установка вентилятора и обводного клапана в вентиляционной шахте. Такое исполнение узла вентиляционной шахты позволяет использовать естественную тягу в холодный период года и механическую – в теплый.

2.7. Комбинированная естественно-механическая система вентиляции

Большинство разработчиков комбинированных систем вентиляции подразумевают использование естественной вытяжки в холодный и переходный период года и механических устройств, для побуждения движения воздуха, в теплый период года. Связано это с тем, что за расчетную температуру наружного воздуха при расчете систем естественной вентиляции принимается температура +5 °С.

При температурах наружного воздуха ниже +5 °С эффективность работы системы в целом повышается.

Решение системы (2.4) при условии изменяющейся температуры наружного воздуха в сторону отрицательных температур показывает, что неравномерность воздухообменов по этажам многоэтажного здания возрастает с понижением температуры. Кроме того, как уже отмечалось выше, увеличение располагаемого давления при низких температурах наружного воздуха приводит к увеличению фактических объемов удаляемого воздуха, что в свою очередь приводит к увеличению объемов инфильтрующегося воздуха. Поддержание требуемых параметров внутреннего воздуха в этом случае возможно только за счет дополнительных теплопоступлений от системы отопления. Поэтому применение механической вентиляции целесообразно не только в теплый период года, когда естественного давления недостаточно для обеспечения работоспособности системы, но и в холодный период года при низких температурах наружного воздуха. Использование вентилятора и изменение коэффициента местного сопротивления вытяжных решеток в квартирах на период работы механической вентиляции также обеспечивает равномерность воздухообменов по этажам в любых диапазонах температур.

Используя предложенную физико-математическую модель, были аналитически определены значения ожидаемых воздухообменов в диапазоне температур наружного воздуха от +15 °С до –30 °С. На основе полученных данных построена режимная карта работы системы комбинированной естественно-механической системы вентиляции (рисунок 2.28).

Показателем эффективности работы системы естественной вентиляции является отношение осредненного по этажам значения фактического расхода удаляемого воздуха $L_{ср}$, м^3/ч, к нормируемому расходу $L_{норм}$, м^3/ч, для заданной температуры воздуха $t_н$, °С. Учитывая тот факт, что нормируемый расход для кухонь и санитарных узлов не одинаков, фактическая эффективность работы естественной вентиляции на режимной карте показана в виде области значений.

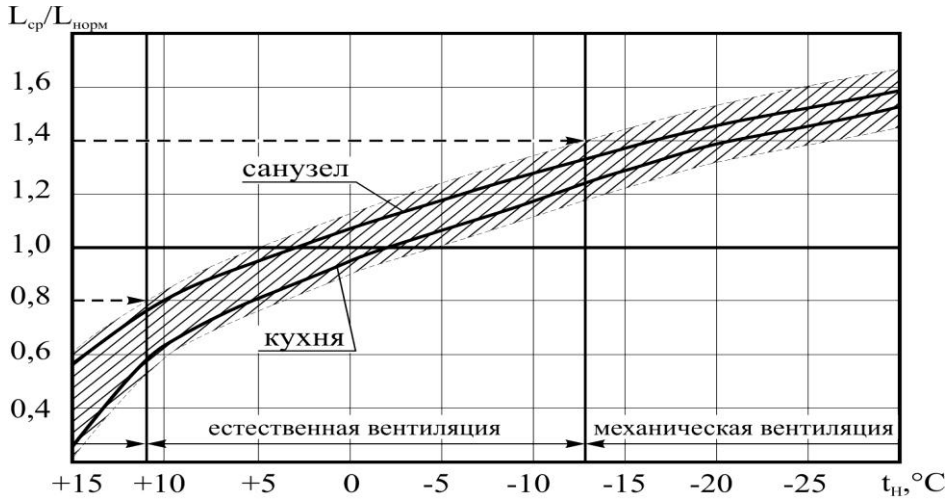


Рисунок 2.28 – Режимная карта работы системы вентиляции

Нижняя граница использования естественной вентиляции обусловлена допустимым отклонением значений воздухообменов от нормируемых, верхняя – экономической целесообразностью применения механической вентиляции. Стоит отметить, что экономическая целесообразность использования механической вентиляции в холодный период года определяется для каждого района строительства отдельно с учетом продолжительности стояния температур (раздел 6.1).

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

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.

2.8. Выводы по главе 2

Изучены и научно обоснованы методы повышения энергоэффективности многоквартирных жилых домов за счет использования систем обеспечения расчетных воздухообменов в квартирах различных этажей, основывающиеся на следующих показателях.

1. Анализ существующих методов расчета интенсивности воздухообменов системами канальной естественной вентиляции и системами с теплыми чердаками показывает значительные отклонения расчетных расходов воздуха от фактических в квартирах, расположенных на различных этажах.

2. Обоснована и разработана физико-математическая модель систем естественной вентиляции многоквартирных жилых домов, учитывающая максимальные допустимые отклонения удельных расходов воздуха из квартир. Физико-математическая модель представляет систему нелинейных алгебраических уравнений, для решения которой применяются итерационные численные методы.

3. Для проверки достоверности физико-математической модели, определения фактических воздухообменов при различных начальных условиях и выявлению значений реальных неравномерностей воздухообменов по этажам в типовых многоквартирных жилых домах проведены натурные исследования режимов эксплуатации систем естественной вентиляции. Сопоставление результатов аналитических расчетов по существующим методикам с результатами натурных исследований удельных воздухообменов в квартирах различных этажей выявило методические недоработки аэродинамических расчетов систем вентиляции с естественным побуждением, особенно в зданиях с теплыми чердаками.

4. Разработанная уточненная методика аэродинамического расчета систем естественной вентиляции для энергоэффективных многоквартирных зданий с теплыми чердаками основана на разделении общей системы на две самостоятельные: «жилое помещение – теплый чердак» (вертикальные стояки); «теплый чердак – атмосферный воздух» (общая вытяжная шахта). Полученные аналитические зависимости по определению располагаемого естественного давления для каждой из раздельных систем характеризуются текущей температурой воздуха в теплом

чердаке, методика определения которой базируется на тепловом балансе конкретного чердака.

5. Полученные по уточненной методике аэродинамического расчета величины воздухообменов по этажам многоквартирного жилого дома лежат в одном численном диапазоне с измеренными в натурных экспериментах.

6. Предложен алгоритм автоматизированного аэродинамического расчета систем естественной вентиляции жилых зданий с теплым чердаком по разработанной методике, учитывающей влияние на располагаемое давление температуры воздуха в теплом чердаке.

7. 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, но сопровождается увеличением капитальных затрат.

Глава 3. ОБЕСПЕЧЕННОСТЬ ПАРАМЕТРОВ МИКРОКЛИМАТА ПОДЗЕМНЫХ ПЕШЕХОДНЫХ ПЕРЕХОДОВ

3.1. Физико-математическая модель аэродинамических процессов в подземных пешеходных переходах

Существующими нормами разрешается обустройство в подземных пешеходных переходах под автомобильными дорогами населенных пунктов торговых точек, мастерских и т.п. Следствием является появление постоянных рабочих мест, на которых требуется круглогодичное поддержание и регулирование параметров микроклимата: минимального расхода воздуха; температуры; относительной влажности воздуха.

В технической литературе имеются апробированные практикой инженерные методы расчета теплового, воздушного и влажностного режимов, производительности систем обеспечения параметров микроклимата метрополитенов, автомобильных и железнодорожных тоннелей, шахт мелкого заложения [72, 80, 90, 94, 183, 198, 223, 234, 253, 289, 339]. Они предусматривают применение механических систем вентиляции и искусственного подогрева воздуха в холодный период года. Существующие эксплуатируемые подземные пешеходные переходы под автомобильными дорогами проектировались и строились без искусственного воздухообмена и обработки атмосферного воздуха, без регулирования круглогодичного температурного режима. Таким образом, возникает практическая необходимость определения количественных показателей динамики формирования параметров микроклимата в рассматриваемых переходах. Необходимо разработать инженерную методику расчета воздушного, температурного и влажностного режимов подземных переходов при круглогодичном режиме эксплуатации с определением коэффициентов обеспеченности параметров микроклимата за счет естественных факторов: гравитационного и ветрового давлений.

По характеру формирования параметров микроклимата переходы могут быть разделены на три типа: I тип – сооружения, в которых происходят суточные и годовые колебания температуры воздуха, связанные с колебаниями температу-

ры атмосферного воздуха; II тип – сооружения, в которых периодически могут возникать ситуации, требующие определения возможного времени достижения какой-либо промежуточной температуры; III тип – сооружения, в помещениях которых не должно происходить значительных колебаний температуры внутреннего воздуха.

Теоретические, экспериментальные лабораторные и натурные исследования возможности создания с заданным коэффициентом обеспеченности допустимых параметров микроклимата в переходах за счет естественных источников энергии выполнены для наиболее простых по объемно-планировочным решениям сооружений I типа (рисунок 3.1). При расчетах, моделировании и в натурных условиях исследовались переходы с длиной тоннелей до 20 м, поперечным сечением тоннелей $F_т$ = 6,0 х 3,0 м, глубиной заложения (отметка пола) 5,0 м. Входы-выходы переходов (порталы) расположены под прямым углом к оси тоннелей. Анализ проведен по выполнению наиболее важного санитарно-гигиенического фактора – достаточность минимально допустимого воздухообмена.

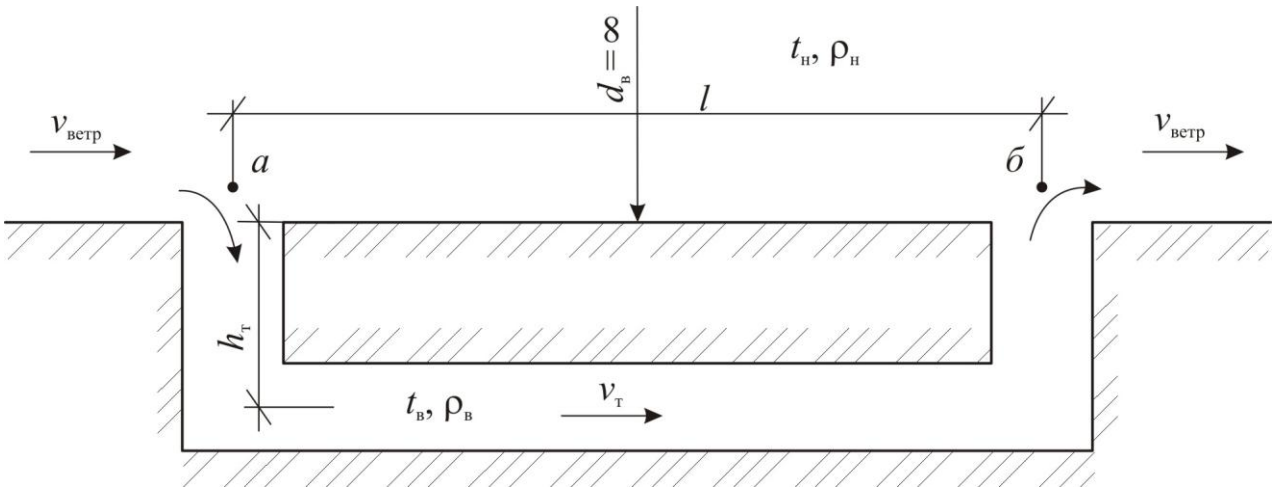


Рисунок 3.1 – Расчетная схема тоннеля подземного перехода

Воздухообмен в тоннелях переходов происходит за счет естественных перепадов давлений (рисунок 3.1). Вентиляция (аэрация) тоннелей в общем случае осуществляется за счет гравитационного $\Delta p_t = h_т(\rho_н - \rho_в)g$, Па, и ветрового $\Delta p_v = v_{ветр}^2 \rho_н / 2$, Па, давлений или их алгебраической суммы, равной полному естественному давлению, $\Delta p_е$, Па:

$$\Delta p_{е} = \Delta p_t + \Delta p_v, \qquad (3.1)$$

где $h_т$ – глубина заложения тоннеля, м; $\rho_н$ и $\rho_в$ – плотность наружного воздуха и воздуха в тоннеле, кг/м^3; $v_{ветр}$ – расчетная скорость наружного воздуха, м/с.

Проанализируем качественные и количественные показатели перепадов давлений, вызывающих устойчивое перемещение воздуха в переходах в круглогодичном цикле эксплуатации.

Гравитационное давление Δp_t. Подземные пешеходные переходы, как правило, выполняются горизонтальными, входные порталы имеют одинаковую величину. Возникающие гравитационные давления одинаковы как в левом, так и в правом портале (рисунок 3.1), т.е. отсутствует градиент давлений, вызывающий перемещение воздуха. Таким образом, глубина заложения типовых подземных переходов под автомобильными дорогами не может оказывать влияния на интенсивность естественного воздухообмена за счет наличия градиента гравитационных сил. Поэтому гравитационную составляющую Δp_t нельзя рассматривать в качестве устойчивого побудителя движения воздуха в тоннелях переходов в круглогодичном цикле эксплуатации.

Ветровое давление Δp_v. Расчет подвижности воздуха в тоннеле перехода по равенству потерь давления в параллельных участках, т. е. атмосферного воздуха о землю и потока воздуха о стены тоннеля приводит к математической неопределенности. При отсутствии внешних местных сопротивлений потоку атмосферного воздуха на расстоянии l, м, между порталами (между точками *а* и *б*, рисунок 3.1) перепад давления, вызывающий движение воздуха в тоннеле Δp_v, является функцией потерь давления наружного воздуха (с коэффициентом трения λ о землю), т.е. $\Delta p_v = Rl = (\lambda l / d_в)(v_{ветр}^2 \rho_н / 2)$, Па.

Использовать данную методику на практике не представляется возможным, поскольку при $d_в \to \infty$ аналитический расчет потерь давления ветра на трение о поверхность земли теряет смысл ($Rl \to 0$). Градиент давлений для переноса воздуха по тоннелю отсутствует, что противоречит лабораторным и натурным исследованиям.

Качественно и количественно расход воздуха в тоннеле перехода обосновывается при рассмотрении динамики *движения жидкости в пограничном слое*. Картина обтекания полуограниченной плоской пластины потоком вязкой жидкости при линиях тока невозмущенного потока u_∞, параллельных пластине, показана на рисунке 3.2.

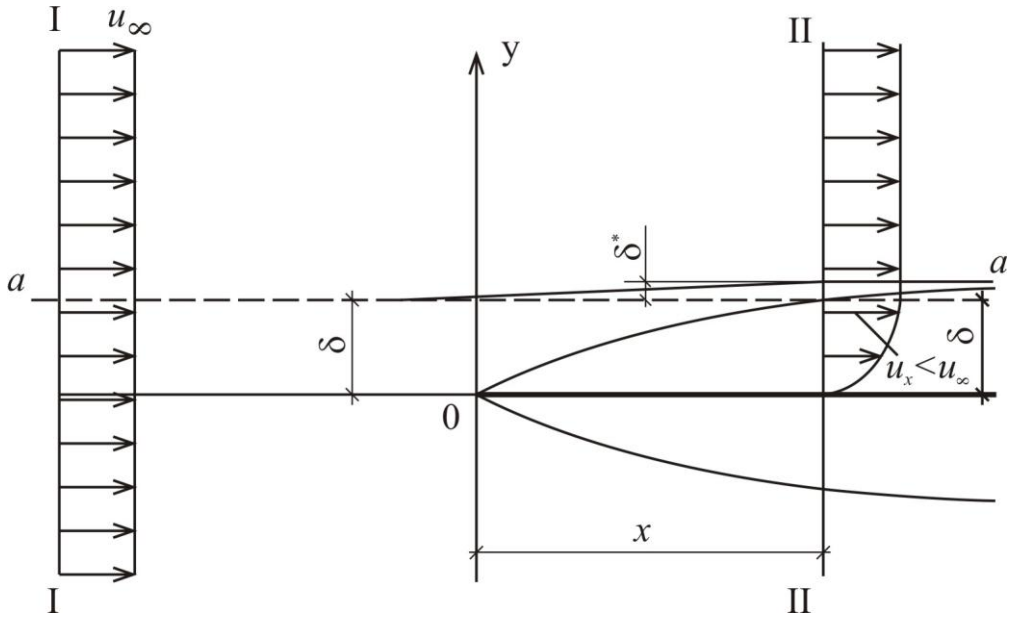


Рисунок 3.2 – Линии тока жидкости при обтекании плоской пластины

В произвольном сечении II − II потока на расстоянии x от входной кромки пластины толщина пограничного слоя составляет δ. Расход воздуха левее точки 0 (сечение I − I), равный $u_\infty\delta$, будет всегда больше расхода в сечении II − II в слое $y = \delta$ правее оси 0 − y, т. к. в пограничном слое скорость меняется от $u_x = 0$ до $u_x = u_\infty$. Для прохождения через сечение II − II того же расхода воздуха, что и через сечение I − I, необходимо увеличить сечение потока. Поэтому линия тока $a - a$ должна отклониться от своего начального положения на величину δ^*.

Величина δ^* называется толщиной вытеснения и определяется из равенства расходов в сечениях I − I и II − II [3]: $u_\infty\delta = u_\infty\delta^* + \int_0^\delta u_x dy$, где $u_\infty\delta^*$ – расход в сечении II − II в слое толщиной δ^*; $\int_0^\delta u_x dy$ – то же, в слое толщиной δ. В конечном виде она равна:

$$\delta^* = \int_0^\delta (1 - u_x/u_\infty)dy. \qquad (3.2)$$

Толщина вытеснения представляет собой величину смещения линии тока вязкой жидкости от линии тока невязкой жидкости, обусловленного влиянием сил вязкости в пограничном слое. Величина δ* по существу не зависит от точности определения толщины пограничного слоя, т. к. уже при некоторых значениях *y* скорость на внешней границе слоя практически равна u_∞, поэтому (3.2) будет иметь вид:

$$\delta^* = \int_0^\infty (1 - \frac{u_x}{u_\infty}) dy. \qquad (3.3)$$

Толщина вытеснения характеризует ту часть расхода, которая теряется в пограничном слое толщиной δ из-за тормозящего действия сил трения на твердой поверхности.

Величина, определяемая интегралом $\delta^{**} = \int_0^\infty \frac{u_x}{u_\infty}(1 - \frac{u_x}{u_\infty}) dy,$ называется толщиной потери импульса. Она характеризует ту часть количества движения жидкости, которая теряется в пограничном слое толщиной δ из-за действия сил трения в пределах слоя [3]:

$$\rho u_\infty^2 \delta^{**} = \int_0^\delta \rho u_x (u_\infty - u_x) dy. \qquad (3.4)$$

По аналогии с определением толщины вытеснения можно сказать, что толщина потери импульса характеризует ту часть количества движения вязкой жидкости, которая теряется в пограничном слое толщиной δ из-за тормозящего действия сил трения в пределах слоя.

Часть воздуха, характеризующаяся величиной толщиной вытеснения δ^*, поступает в тоннель перехода. Количественно величина движущей силы воздухообмена соответствует толщине потери импульса δ^{**}. Таким образом, зависимость (3.2) характеризует расходные показатели потоков воздуха в тоннеле, а величина (3.4) движущую силу переноса.

Решение уравнений (3.2) и (3.4) предъявляет жесткие требования к точности экспериментального определения значений потери импульса δ^{**} и толщины вы-

тесняющего слоя δ^*. Становится бессмысленным их определение, если ошибка точности эксперимента соизмерима с измеренными количественными показателями по абсолютной величине из-за снижения ценности численных решений. В то же время, используя теорию пограничного слоя, появилась возможность провести полный качественный анализ физических явлений, определяющих интенсивность воздухообмена в тоннелях подземных переходов [33].

Аэродинамический коэффициент препятствия. Влияние касательного напряжения при течении вдоль плоской полуограниченной пластины τ_o и давления набегающего потока ρ на количество движения в пограничном слое в гидромеханике называют соотношением Кармана [3]:

$$\frac{d}{dx}\int_0^{\delta}\rho u_x^2 dy - u_\infty \frac{d}{dx}\int_0^{\delta}\rho u_x dy = -\delta d\rho - \tau_o . \qquad (3.5)$$

С учетом введения толщины потери импульса δ** и толщины вытеснения δ* для несжимаемой жидкости получено:

$$\frac{\tau_0}{\rho} = \frac{d}{dx}(u_\infty^2 \delta^{**}) + \frac{du_\infty}{dx}(u_\infty \delta^*) . \qquad (3.6)$$

Данное уравнение справедливо как для ламинарного, так и турбулентного потоков.

Коэффициент местного сопротивления при определении силы трения в случае одностороннего обтекания плоской пластины вязким потоком:

$$c_f = \frac{\tau_0}{\rho u_\infty^2 / 2} \qquad (3.7)$$

Коэффициент сопротивления трения c_F при двухстороннем обтекании гидравлически гладких поверхностей определяется по формуле Кармана [299]:

$$c_F = 0{,}072\,\mathrm{Re}_l^{-0{,}2} \qquad (3.8)$$

или по формуле Шлихтинга:

$$c_F = 0{,}455(\lg \mathrm{Re}_l)^{-2{,}58}, \qquad (3.9)$$

где $\mathrm{Re}_l = u_\infty l/\nu$, l – длина пластины.

Для режима гидравлически шероховатых поверхностей влиянием вязкости пренебрегают. Уравнение Шлихтинга имеет вид при $10^2 < l/k_э < 10^6$:

$$c_F = (1{,}89 + 1{,}62 \lg \frac{l}{k_э})^{-2{,}5}, \qquad (3.10)$$

где $k_э$ – абсолютная эквивалентная шероховатость поверхностей пластины.

А.Д. Альтшулем для коэффициента гидравлического сопротивления по длине получено уравнение

$$c_F = 0{,}03\left(\frac{k_э}{l} + \frac{83}{\mathrm{Re}_l}\right)^{0{,}2}, \qquad (3.11)$$

которое может быть использовано для расчета по всей области турбулентного течения вдоль пластины.

На поверхности обтекаемых тел различной конфигурации и размеров используется понятие относительного давления или коэффициента давления:

$$K = \frac{p_{изб}}{\rho u_\infty^2 / 2}, \qquad (3.12)$$

где $p_{изб}$ – избыточное давление в произвольной точке на поверхности обтекаемого тела; $\rho u_\infty^2 / 2$ – динамическое давление невозмущенного потока.

Если в качестве избыточного давления на поверхности принимать манометрическое давление $p_{ман} = p - p_{ат}$, то относительное давление называется аэродинамическим коэффициентом:

$$c_v = p_{ман}/(\rho u_\infty^2 / 2). \qquad (3.13)$$

Независимо от числа Re аэродинамический коэффициент является функцией только формы препятствия и его расположения по отношению к направлению набегающего невозмущенного потока.

Для случая обтекания потоком жидкости или газа тонких профилей, расположенных поперек набегающего потока, сила сопротивления определяется разностью давлений перед препятствием и в области отрывного течения за ним:

$$F_Д = c_Д \omega \rho u_\infty^2 / 2, \qquad (3.14)$$

где $c_Д$ – коэффициент сопротивления давления; ω − площадь сечения обтекаемого тела по миделю; ρ – плотность жидкости или газа.

При больших числах Рейнольдса (отсутствует влияние вязкости) коэффициент сопротивления давления зависит только от формы тела [3] (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Значения коэффициента сопротивления для некоторых тел [3]

Форма обтекаемого тела	$c_Д$
Диск	1,11
Прямоугольная пластина с отношением *а/б*	
1	1,10
2	1,15
4	1,19
10	1,29
∞	2,01

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 3.3). Они устанавливаются со стороны автомобильных трасс перпендикулярно оси тоннеля.

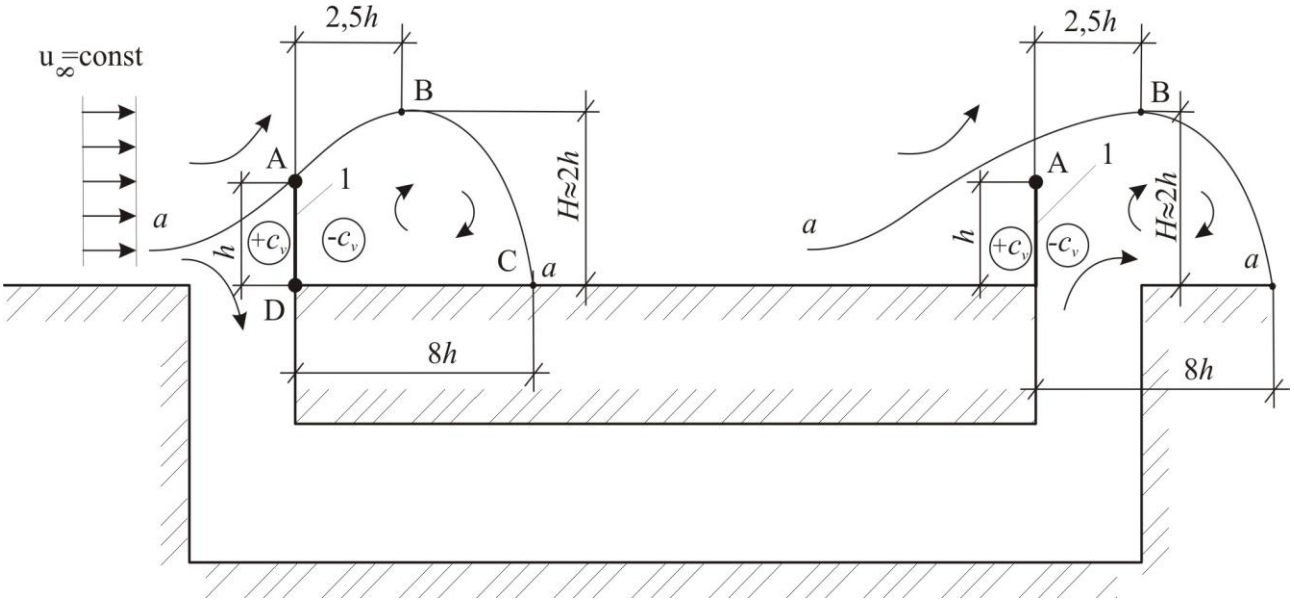


Рисунок 3.3 - Схема формирования зон аэродинамических коэффициентов

Поток воздуха, обтекающий препятствие высотой h, м, делится на две области течения с границей по линии *а-а*, проходящей через точку отрыва А. За препятствием ниже линии *а-а* располагается область течения с отрицательным аэродинамическим коэффициентом ($-c_v$). Выше линии *а-а* 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 $c_v = 0{,}5…0{,}8$, на заветренной $c_v = -0{,}2…-0{,}3$ [4, А.35].

Проведенный анализ исследований по выявлению количественных зависимостей переноса массы воздуха по идеализированному подземному переходу, изображенному на рисунке 3.1, показал практическую невозможность аналитически-экспериментального определения градиентов переноса. Можно согласиться с выводом [131], что ценность численных решений зависит от точности полученных из опыта коэффициентов переноса, и выбор математической модели должен соответствовать степени точности их определения. Чем с меньшей достоверностью известны коэффициенты переноса, тем проще должна быть математическая модель. В то же время следует помнить, что в тоннеле идеализированного подземного перехода (рисунок 3.1) наблюдается перенос массы воздуха за счет гравитационных сил (Δp_t) и сил ветрового давления (Δp_v) над горизонтальной гладкой поверхностью земли и отсутствует поверхность над входом-выходом в подземном пешеходном переходе.

Определяющей величиной интенсивности воздухообмена является практически постоянно действующее ветровое давление Δp_v. Гравитационное давление Δp_t знакопеременно по периодам года и в реальных условиях значительно меньше ветрового.

Для количественного определения массы перемещаемого по реальным подземным пешеходным переходам воздуха необходимо проведение натурных и лабораторных (на модели в аэродинамической трубе) исследований. Эксперименты должны включать как определение скорости воздуха в тоннеле без внешних препятствий у порталов, так и при наличии искусственных препятствий. В последнем случае задача состоит в определении значений аэродинамических коэффициентов c_v во фронтальной (наветренной) и кормовой (заветренной) сторон препятствий при различных углах обдува и различной воздухопроницаемости препятствий.

3.2. Лабораторные исследования динамики воздухообмена в подземных пешеходных переходах

Целью экспериментальных лабораторных исследований интенсивности воздухообмена в подземных пешеходных переходов являлось:

− определение количественных характеристик и направлений движения воздуха в тоннелях переходов без внешних препятствий и при наличии препятствий движению наружного воздуха при различных углах обдува модели;

− получение аналитических зависимостей по расчету скорости движения воздуха в тоннелях при различных нестационарных внешних воздействиях;

− выявление и обоснование коэффициентов обеспеченности по подаче минимального количества наружного воздуха в тоннелях переходов при естественных источниках энергии (ветровом давлении).

Лабораторные исследования модели перехода проводились в аэродинамической трубе кафедры отопления и вентиляции ННГАСУ. Экспериментальные исследования велись совместно с к.т.н., доцентом В.В. Суховым [267] под общим руководством д.т.н., профессора В.И. Бодрова.

3.2.1. Методика экспериментальных исследований

Схема аэродинамической трубы и ее рабочей площадки с указанием основных элементов установки приведены на рисунках 3.4 и 3.5.

Скорость воздуха в приточном патрубке аэродинамической трубы регулировалась съемными диафрагмами от 5,0 до 13,0 м/с. Для сохранения структуры полей скоростей на рабочей площадке изменение расхода воздуха в приточном патрубке трубы осуществлялось за счет изменения поперечного сечения всасывающего патрубка. Средняя скорость воздуха на рабочей площадке трубы варьировалась до 10 м/с.

Модель рассмотренного выше исследуемого пешеходного перехода типа I выполнена в масштабе 1:200 (рисунок 3.6, 3.7). На рисунке 3.7 римскими цифрами (I^*, II^*, III^*, IV^*, V^*) показаны точки, в которых замерялась скорость воздушного

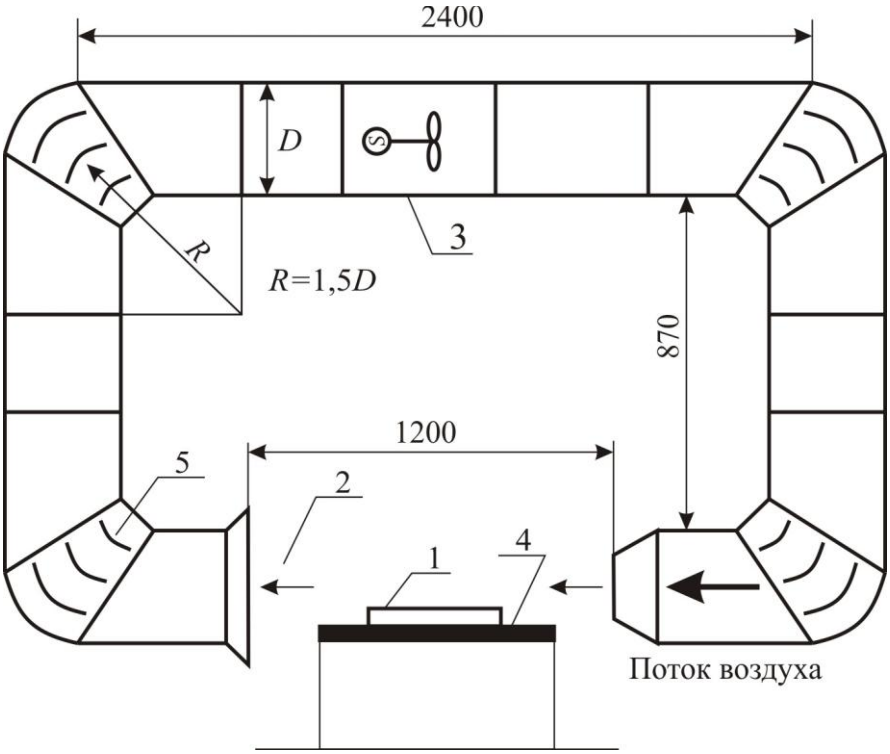


Рисунок 3.4 – Схема аэродинамической трубы: 1 – исследуемая модель; 2 – рабочая область трубы; 3 – аэродинамическая труба с осевым вентилятором; 4 – подставка под модель; 5 – направляющие ребра

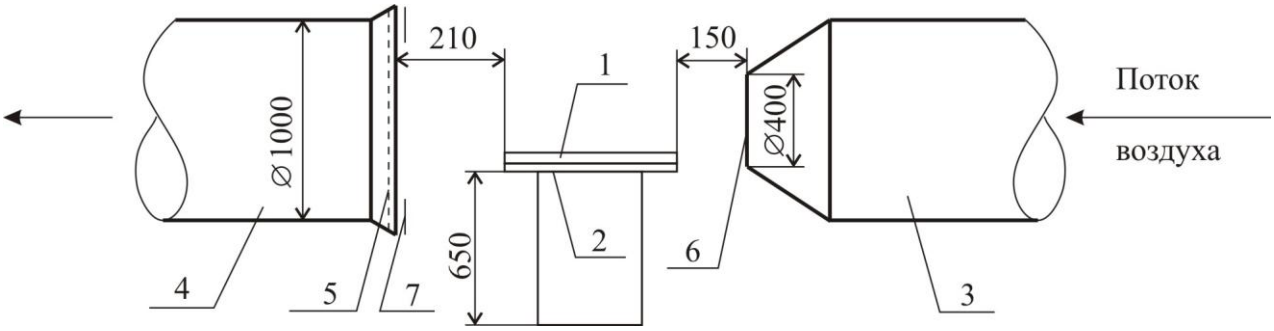


Рисунок 3.5 – Рабочая площадка аэродинамической трубы: 1 – исследуемая модель; 2 – подставка под модель; 3 – нагнетательный воздуховод; 4 – всасывающий воздуховод; 5 – защитная сетка на всасывающем патрубке; 6 – нагнетательный патрубок; 7 – съемные диафрагмы

потока над моделью. Изменение направления движения воздуха (ветра) осуществлялось поворотом модели на 0° (режим А), 30° (режим Б), 45° (режим В), 60° (режим Г), 90° (режим Д). Режим А (0°) соответствовал оси тоннеля модели и нагнетательного патрубка аэродинамической трубы.

Замеры скорости воздуха и температуры окружающего воздуха проводились измерителем комбинированным ТАММ-20. Прибор имеет следующие технические характеристики: скорость воздушного потока v = 0,05…20,0 м/с; предел допускаемой абсолютной основной погрешности (Δ_0) при измерении скорости

воздушного потока ± (0,05…0,06)v, м/с; предел допускаемой абсолютной основной погрешности при измерении температуры воздуха Δ_0 = ± 1 %.

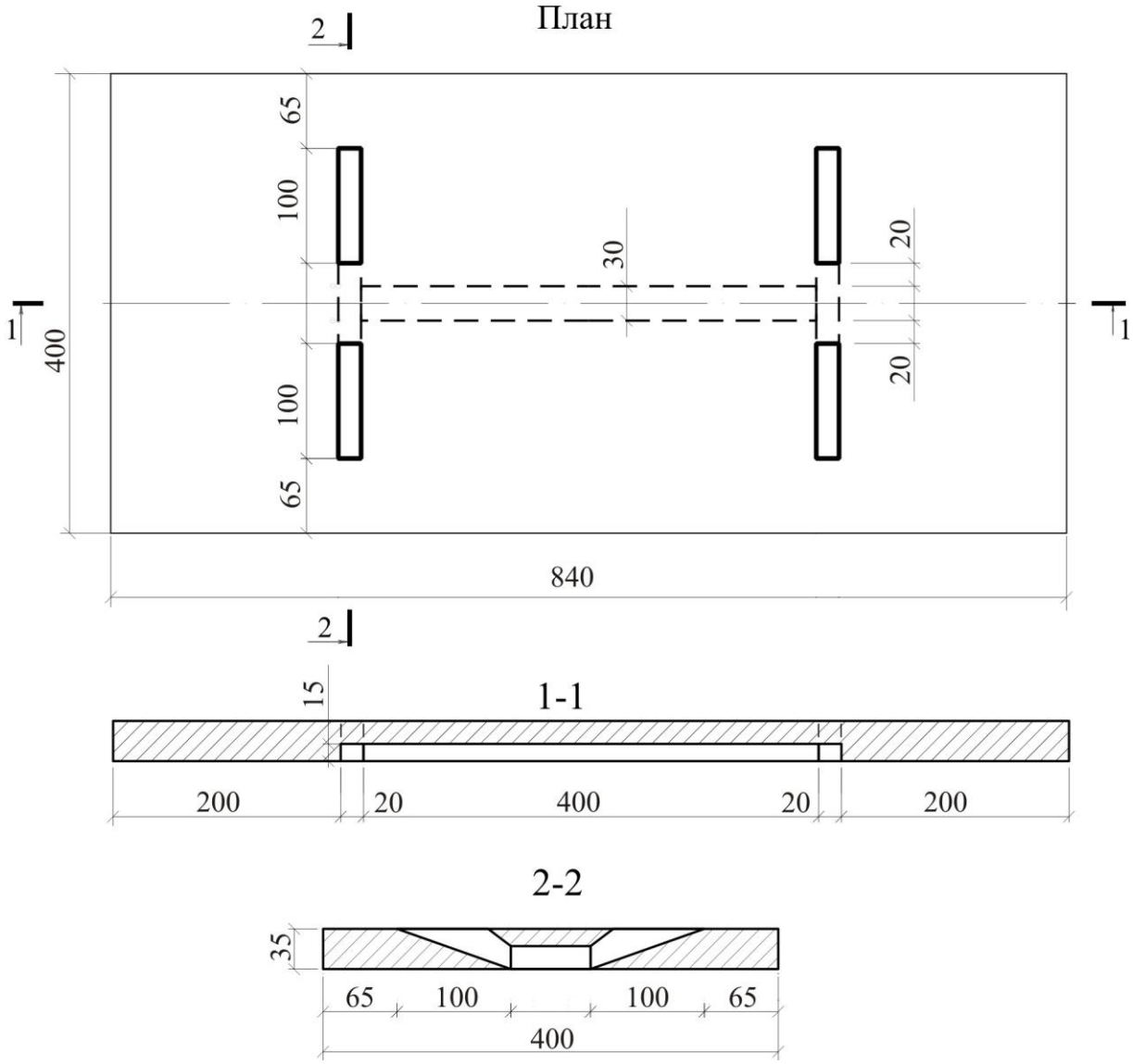


Рисунок 3.6 – Модель подземного пешеходного перехода

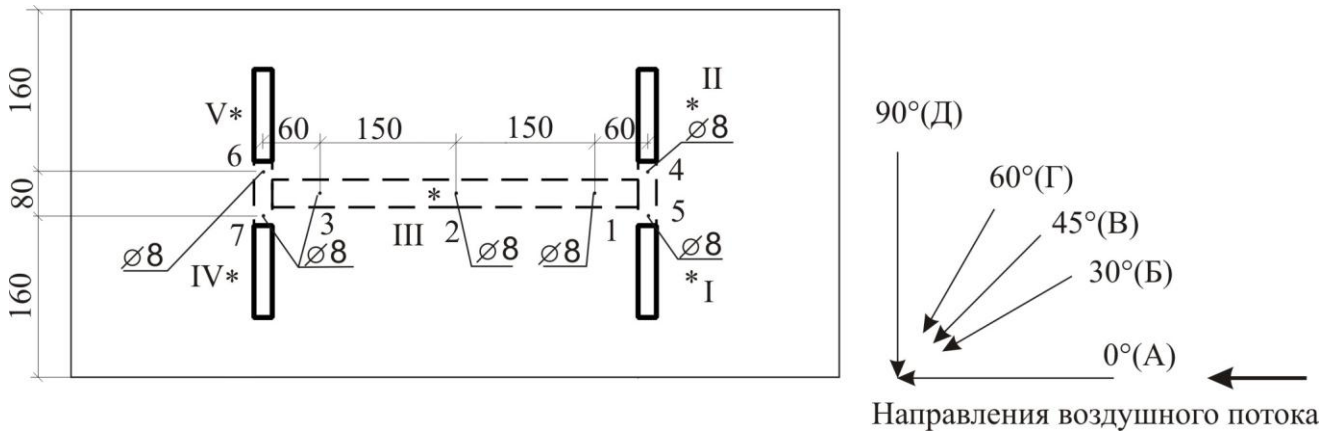


Рисунок 3.7 – Измерение скорости воздуха при испытании модели: ● – в пешеходном переходе (цифры арабские); * − над моделью (цифры римские).

Для выявления динамики потоков воздуха в тоннеле модели приняты три основные факторы, характерные при использовании для создания и поддержания допустимых параметров микроклимата в подземных переходах с использованием только естественных источников энергии:

− переменная скорость воздуха, обдувающего модель;

− углы 0°, 30°, 45°, 60°, 90° между осью тоннеля модели и преобладающим направлением обдувающего модель воздуха, характерные при круглогодичной эксплуатации переходов I типа;

− отсутствие или наличие с различными физическими характеристиками препятствий потоку, обдувающего модель воздуха.

Наличие естественных (кусты, деревья) и искусственных (рекламные щиты и т.п.) препятствий над подземными пешеходными переходами, которые имеют место в реальных условиях эксплуатации, при проведении лабораторных исследований имитировались с помощью сплошных и сетчатых перегородок, имеющих различную высоту: H_1 = 50 мм, H_2 = 100 мм, H_3 = 200 мм. В ходе проведения эксперимента препятствия устанавливались под углами 0°, 30°, 45°, 60°, 90° к оси модели. В связи с обоснованной однофакторной зависимостью аэродинамических коэффициентов c_v от числа Re при постоянном значении других факторов, принято число повторяющихся в процессе экспериментов опытов, равное трем [299].

На рисунках 3.8, 3.9 и 3.10 показаны основные элементы лабораторной экспериментальной установки.

а) б)

Рисунок 3.8 – Виды препятствий: а – сплошной высотой H = 200 мм; б − сетчатый H = 100 мм

Рисунок 3.9 – Общий вид лабораторной аэродинамической трубы

Рисунок 3.10 – Модель испытанного подземного пешеходного перехода

3.2.2. Аэродинамические характеристики модели перехода без внешних препятствий

Обработанные результаты экспериментальных исследований аэродинамических характеристик модели подземного перехода приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2. − Аэродинамические характеристики модели подземного перехода

Режимы работы, диаметр всасывающего патрубка, мм	Направление угла обдува воздухом α, град	Средняя скорость воздуха, $v_{аэр}$, м/с	Осредненная скорость воздуха, $v^{оср}$, м/с	Средняя скорость воздуха в тоннеле $v_т$, м/с	Средний расход воздуха в тоннеле, $L_т$, м^3/ч	Невязки Δ, %
1	2	3	4	5	6	7
I, 1000	0	9,86	7,41	0,56	0,903	−13; −28,5
	30	9,9	7,23	0,55	0,89	−25,8; −22,2
	45	9,62	7,55	0,54	0,87	−13,8; 28,7
	60	9,55	6,73	0,47	0,77	27,3; 23,4
	90	9,76	6,43	0,03	0,049	неуст. режим
Среднее значение, $v_{ср}$		9,74	7,07	0,53	0,86	
II, 835	0	8,89	7,01	0,58	0,94	−23,4; −17,0
	30	8,84	7,39	0,51	0,826	−0,5; 35,8
	45	8,81	6,64	0,47	0,71	21,2; 25,4
	60	9,14	6,7	0,39	0,63	−11,1; 25,4
	90	9,11	5,46	0,03	0,049	неуст. режим
Среднее значение, $v_{ср}$		8,96	6,64	0,49	0,78	
III, 260	0	4,89	1,44	0,27	0,43	−6,9; −16,3
	30	4,85	1,58	0,29	0,47	−14,9; 25,5
	45	4,87	1,725	0,27	0,44	−29,5; 29,5
	60	5,22	2,45	0,27	0,43	−27,9; 27,9
	90	6,13	2,26	0	0	неуст. режим
Среднее значение, $v_{ср}$		5,2	1,89	1,33	0,44	
IV, 50	0	2,85	1,33	0,22	0,36	−2,8; −25,0
	30	2,95	1,18	0,21	0,34	−20,6; 26,5
	45	2,77	1,14	0,21	0,35	25,4; −32,0
	60	2,77	1,1	0,19	0,31	0; −22,6
	90	2,69	0,92	0,02	0,03	неуст. режим
Среднее значение, $v_{ср}$		2,81	1,13	0,21	0,34	

Значения осредненной скорости воздушного потока в патрубке аэродинамической трубы $v_{аэр}$, м/с, определялись по общепринятой методике равновеликих колец. Средняя скорость воздуха по трем замерам $v_{ср}$, м/с, определялась как среднеарифметическая $v_{ср} = \sum_{1}^{3} v/3$. На рабочей площадке аэродинамической трубы за-

мерялась осредненная скорость воздушного потока $v_{оср}$. Расход воздуха, м^3/ч, в каждой точке замера в тоннеле перехода определялся по формуле:

$$L_т = v_т \cdot F_т \cdot 3600 \ , \qquad (3.15)$$

где $v_т$ – скорость воздушного потока в тоннеле, м/с;

$F_т$ – площадь поперечного сечения тоннеля в месте замера, м^2.

Площадь поперечного сечения тоннеля модели перехода $F_т = 45 \cdot 10^{-5}$ м^2, входов-выходов $F_{вх} = F_{вых} = 3 \cdot 10^{-4}$ м^2.

Результаты замеров расходов воздуха при различных углах обдува и режимах представлены в приложении 4 (графы 9…18).

В ходе обработки полученных экспериментальных данных определены невязки расходов на входах и выходах в модель перехода, вызванные погрешностью при проведении эксперимента. Невязка расходов воздуха Δ, %, находились из условия баланса расходов воздуха во входах $L_{вх} = L_4 + L_5$, выходах $L_{вых} = L_6 + L_7$ и тоннеле пешеходного перехода $L_т^{ср} = (L_1 + L_2 + L_3)/3$:

$$\Delta = \frac{L_т^{ср} - (L_{вх} - L_{вых})}{L_т^{ср}} \cdot 100\,\%. \qquad (3.16)$$

Средние невязки между расходами воздуха, проходящего по тоннелю, поступающими в и удаляемыми из тоннеля составляют от −15 % до 20 %.

Для дальнейшего анализа полученных данных и выявления закономерностей движения воздушных потоков в подземном переходе было проведено сглаживание полученных значений расходов воздуха в тоннеле и входах-выходах. Сглаживание данных, с математической точки зрения, является частным случаем регрессии. В отличие от интерполяции и регрессии результатом сглаживания является новый, более гладкий набор значений величины, а не функция, которая описывает не только значения в данных точках, но и между ними.

Для сглаживания экспериментально полученных данных были использованы функции сглаживания *Mathcad* [95]:

– *supsmooth (X,Y)* – возвращает вектор линейно сглаженных данных *Y*, методом наименьших квадратов по *k* отсчетам с адаптивным выбором значения *k* с учетом динамики изменения данных;

– *medsmootth (y,b)* – вычисляет вектор сглаженных данных по методу скользящей медианы с шириной окна *b*.

Метод наименьших квадратов заключается в минимизации функции квадратов остаточных ошибок, т.е. уточненная величина выбирается таким образом, чтобы сумма квадратов отклонений расчетных величин $\hat{y}_i$ от исходных y_i была минимальной: $\sigma = \sum_{i=1}^{n} (\hat{y}_i - y_i)^2 \longrightarrow \min$.

Скользящий медианный фильтр шириной $b = 2n + 1$ – это преобразователь, выходное значение y_k которого для текущего отсчета k формируется из входного временного ряда $\ldots, x_{k-1}, x_k, x_{k+1}, \ldots$ в соответствии с формулой [95, 146]:

$$y_k = med\,(x_{k-n}, x_{k-n+1}, \ldots, x_{k-1}, x_k, x_{k+1}, \ldots, x_{k+n-1}, x_{k+n}), \qquad (3.17)$$

где $med\,(x_1, \ldots, x_m, \ldots, x_{2n+1}) = x_{n+1}$, x_m – элементы вариационного ряда, т.е. упорядоченных в порядке возрастания значений $x_1, x_2, \ldots, x_m$: $x_{(1)} = \min(x_1, x_2, \ldots, x_{2n+1}) \le x_{(2)} \le x_{(3)} \le \ldots \le x_{2n+1} = \max(x_1, x_2, \ldots, x_{2n+1})$.

Таким образом, медианная фильтрация осуществляет замену исходных значений в центре окна медианным значением.

При сглаживании не учитывались значения замеров обдува модели под углом 90° при всех режимах, поскольку в ходе эксперимента при этих условиях наблюдалась неустойчивость потока воздуха в тоннеле.

Скорректированные значения L' указаны в графе 19 приложения 4.

Среднее значение расхода воздуха в тоннеле $L'_{ср}$ определялось как среднеарифметическое из трех замеров (графа 20 приложения 4).

Дальнейшая корректировка значений расходов на входах-выходах перехода L_4, L_5, L_6 и L_7 проводилась пропорционально полученному в результате сглаживания значению $L'_{ср}$ (таблицы 3.3, 3.4).

3.2.3. Сопоставление экспериментальной динамики воздушных потоков с теорией профессора П.Н. Каменева

При планирования эксперимента были заданы предполагаемые направления движения воздуха, при которых возможно обеспечение максимального воздухообмена в тоннеле модели перехода (рисунок 3.11, а). Указанные направления движения возможны только при поступлении воздуха через два входа и удалении воздуха через два выхода.

В ходе проведения экспериментальных исследований при различных скоростях и углах обдува модели наблюдалось изменение направления движения воздуха во входах-выходах относительно первоначально заданного (рисунок 3.11, б, в). Условия отклонения направлений движения воздуха в порталах входов-выходов проанализированы с использованием теории смешивания потоков профессора П.Н. Каменева.

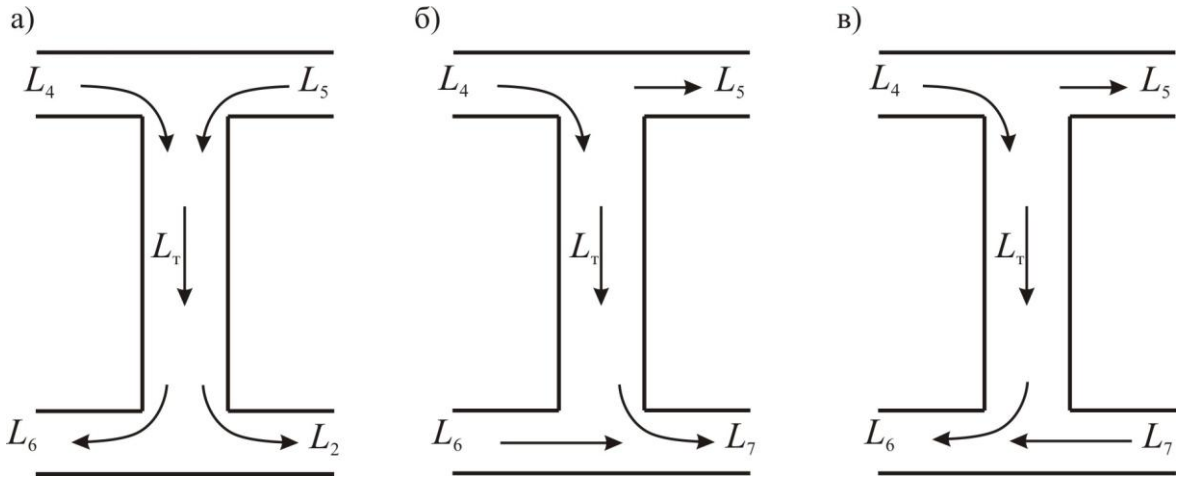


Рисунок 3.11 - Возможные направления движения воздуха в порталах и тоннеле перехода

Условия возникновения явления эжекции в порталах переходов нами проанализировано на основе теории движения потоков профессора П.Н. Каменева (глава 1).

Применительно к анализу полученных экспериментальных данных (таблица 3.3) уравнение (1.34) можно записать: $C = (L_4 / L_5)^2$, а корни уравнения соответственно:

$$\beta_1 = \frac{1}{1+\sqrt{\left(\frac{L_4}{L_5}\right)^2}} = \frac{1}{1+\frac{L_4}{L_5}} = \frac{L_5}{L_4+L_5}; \beta_1' = \frac{1}{1-\sqrt{\left(\frac{L_4}{L_5}\right)^2}} = \frac{1}{1-\frac{L_4}{L_5}} = \frac{L_5}{L_4-L_5}. \quad (3.18)$$

С учетом $L_4 + L_5 = L'_{\text{ср}}$, получим:

$$\beta_1 = L_5 / L'_{\text{ср}}; \qquad (1-\beta_1) = L_4 / L'_{\text{ср}}. \quad (3.19)$$

Проводя аналогичный анализ в отношении выходов, получим:

$$\beta_1 = \frac{1}{1+\sqrt{\left(\frac{L_7}{L_6}\right)^2}} = \frac{1}{1+\frac{L_7}{L_6}} = \frac{L_7}{L_6+L_7}; \ \beta_1' = \frac{1}{1-\sqrt{\left(\frac{L_7}{L_6}\right)^2}} = \frac{1}{1-\frac{L_7}{L_6}} = \frac{L_6}{L_6-L_7}. \quad (3.20)$$

Учитывая, что $L_6 + L_7 = L'_{\text{ср}}$, имеем:

$$\beta_1 = L_6 / L'_{\text{ср}}; \qquad (1-\beta_1) = L_7 / L'_{\text{ср}}. \quad (3.21)$$

Графически решение данных уравнений показано на рисунке 3.12. Расчетные значения представлены в таблицах 3.3, 3.4. Прослеживается практически полная сходимость полученных экспериментальных данных на модели с теорией смешения потоков профессора П.Н. Каменева, опубликованной в работе [131].

Явление эжекции на входах в подземный пешеходный переход наблюдается при угле обдува менее 30°, и, соответственно, не наблюдается на выходах из перехода, что подтверждается положительными значениями корня β_1. При увеличении угла обдува картина движения воздуха во входах-выходах меняется: эжекция на входах отсутствует и имеет место на выходах.

Смена знака значения корня β'_1 для выходов с «+» на «−» с увеличением угла обдува (более 45°) и уменьшением скорости (режим III, IV) указывает на изменение направления движения воздуха − он эжектируется через выход 2 (рисунок 3.11, в). Воздухообмен в тоннеле перехода при таких условиях минимален.

Область вероятного отсутствия естественной вентиляции за счет ветрового давления при отсутствии внешних препятствий у подземных переходов показана на рисунке 3.13 (заштрихованная часть).

Таблица 3.3 − Решение уравнения движения на входах в пешеходный переход

Режим	Угол обдува, α, град	Расход воздуха, м³/ч			C	$\beta_1 = \frac{1}{1+\sqrt{C}}$	$\beta_1' = \frac{1}{1-\sqrt{C}}$
		$L'_{ср}$	L_4	L_5			
I	0 (А)	1,001	0,460	0,541	0,720	0,541	
	30 (Б)	0,944	1,523	0,579	6,918		−0,613
	45 (В)	0,808	1,435	0,627	5,234		−0,777
	60 (Г)	0,664	2,140	1,476	2,103		−2,222
II	0 (А)	1,029	0,508	0,521	0,952	0,506	
	30 (Б)	0,77	1,406	0,636	4,887		−0,826
	45 (В)	0,635	1,618	0,983	2,709		−1,548
	60 (Г)	0,637	1,675	1,038	2,605		−1,629
III	0 (А)	0,432	0,225	0,207	1,171	0,480	
	30 (Б)	0,284	0,769	0,485	2,513		−1,709
	45 (В)	0,228	0,662	0,434	2,325		−1,906
	60 (Г)	0,232	0,732	0,500	2,142		−2,157
IV	0 (А)	0,391	0,159	0,232	0,467	0,594	
	30 (Б)	0,275	0,612	0,337	3,296		−1,226
	45 (В)	0,128	0,303	0,175	3,000		−1,366
	60 (Г)	0,08	0,387	0,307	1,589		−3,837

Таблица 3.4 − Решение уравнения движения на выходах в пешеходном переходе

Режим	Угол обдува, α, град	Расход воздуха, м³/ч			C	$\beta_1 = \frac{1}{1+\sqrt{C}}$	$\beta_1' = \frac{1}{1-\sqrt{C}}$
		$L'_{ср}$	L_6	L_7			
I	0 (А)	1,001	0,484	0,517	0,874	0,517	
	30 (Б)	0,944	0,863	1,807	0,228		1,915
	45 (В)	0,808	0,840	1,648	0,260		2,040
	60 (Г)	0,664	0,952	1,616	0,347		2,434
II	0 (А)	1,029	0,515	0,515	1	0,5	
	30 (Б)	0,77	1,227	1,997	0,377		2,593
	45 (В)	0,635	0,714	1,349	0,280		2,125
	60 (Г)	0,637	1,135	1,772	0,410		2,781
III	0 (А)	0,432	0,303	0,129	5,465	0,300	
	30 (Б)	0,284	0,441	0,157	7,863		−0,554
	45 (В)	0,228	0,385	0,157	5,998		−0,690
	60 (Г)	0,232	0,377	0,145	6,771		−0,624
IV	0 (А)	0,391	0,276	0,115	5,789	0,294	
	30 (Б)	0,275	0,110	0,385	0,082		1,401
	45 (В)	0,128	0,183	0,055	11,2		−0,427
	60 (Г)	0,08	0,131	0,051	6,61		−0,636

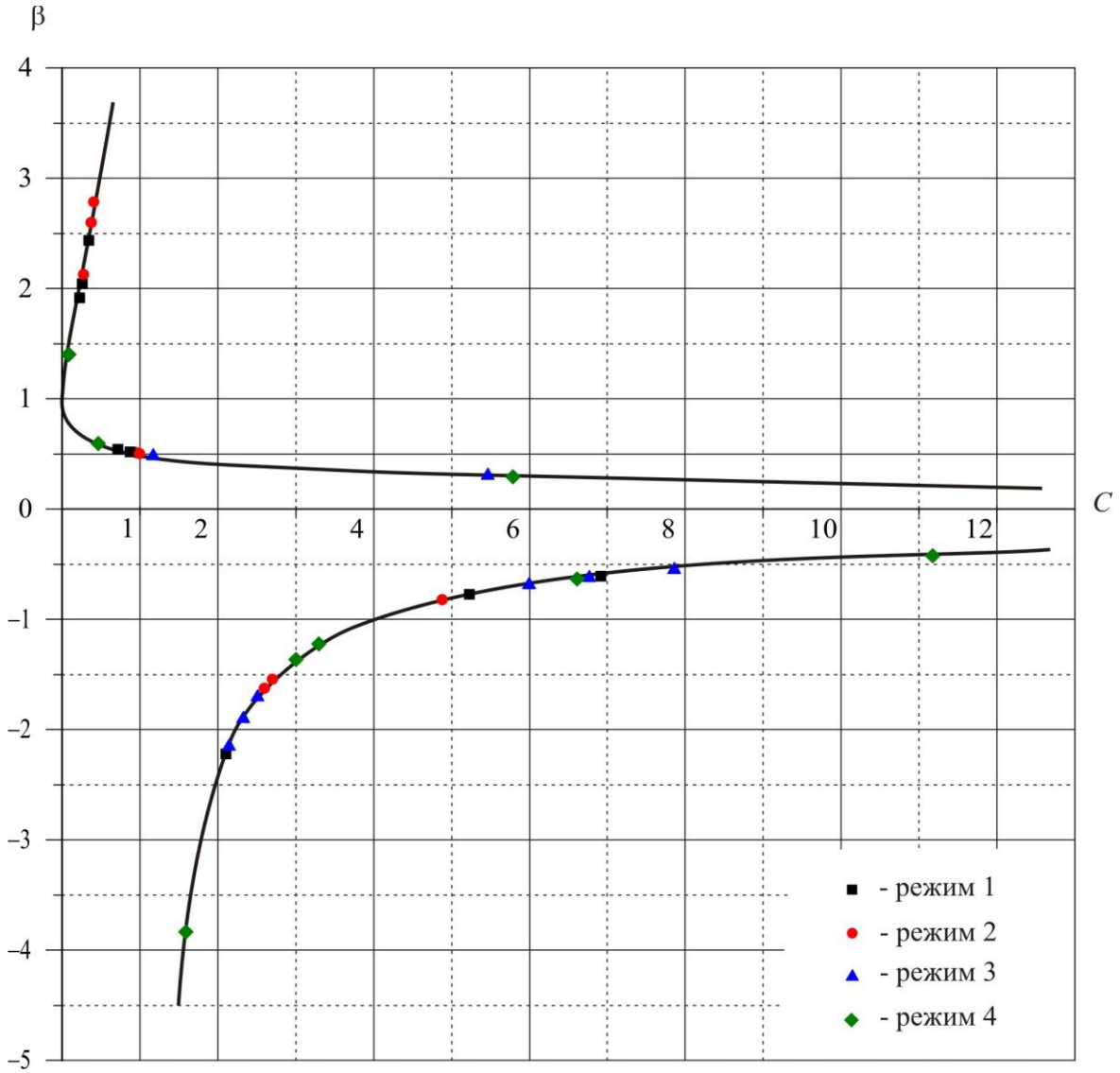


Рисунок 3.12 – Графическое решение уравнения смешивания потоков профессора П.Н. Каменева, сопоставление с экспериментальными результатами на модели пешеходного перехода

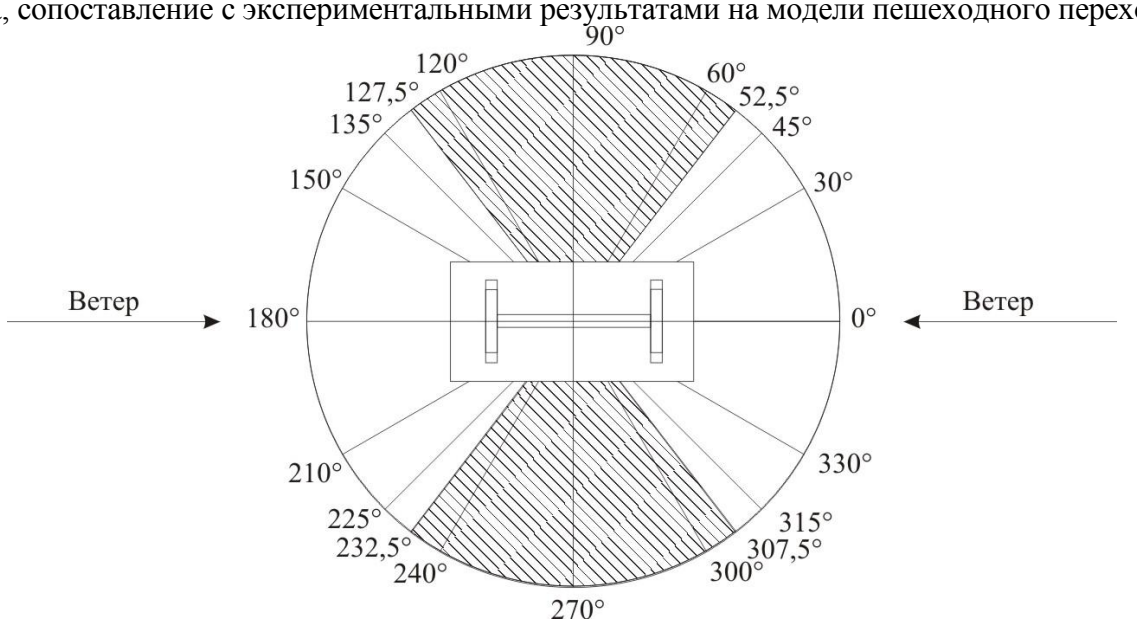


Рисунок 3.13 – Область естественной вентиляции за счет ветрового давления относительно оси тоннеля модели при отсутствии внешних препятствий

3.2.4. Аэродинамические характеристики модели перехода при наличии внешних препятствий

Наличие естественных (кусты, деревья) и искусственных (специально возводимые или рекламные щиты) препятствий над подземными пешеходными переходами, которые имеют место в реальных условиях эксплуатации, при проведении лабораторных исследований имитировались с помощью сплошных и сетчатых перегородок, имеющих различную высоту: H_1 = 50 мм, H_2 = 100 мм, H_3 = 200 мм. В ходе проведения экспериментов препятствия устанавливались под углами 30°, 45°, 60° и 90° к оси модели.

Обработанные осредненные значения полученных экспериментально скоростей воздуха в тоннеле $v_т$ и расхода воздуха $L_т$ представлены в таблице 3.5. Графически обобщенные результаты исследований скорости воздуха в тоннеле $v_т$ представлены на рисунках 3.14 и 3.15. Невязка расходов на входах-выходах и в тоннеле перехода составила от −15,2 % до 18,9 %.

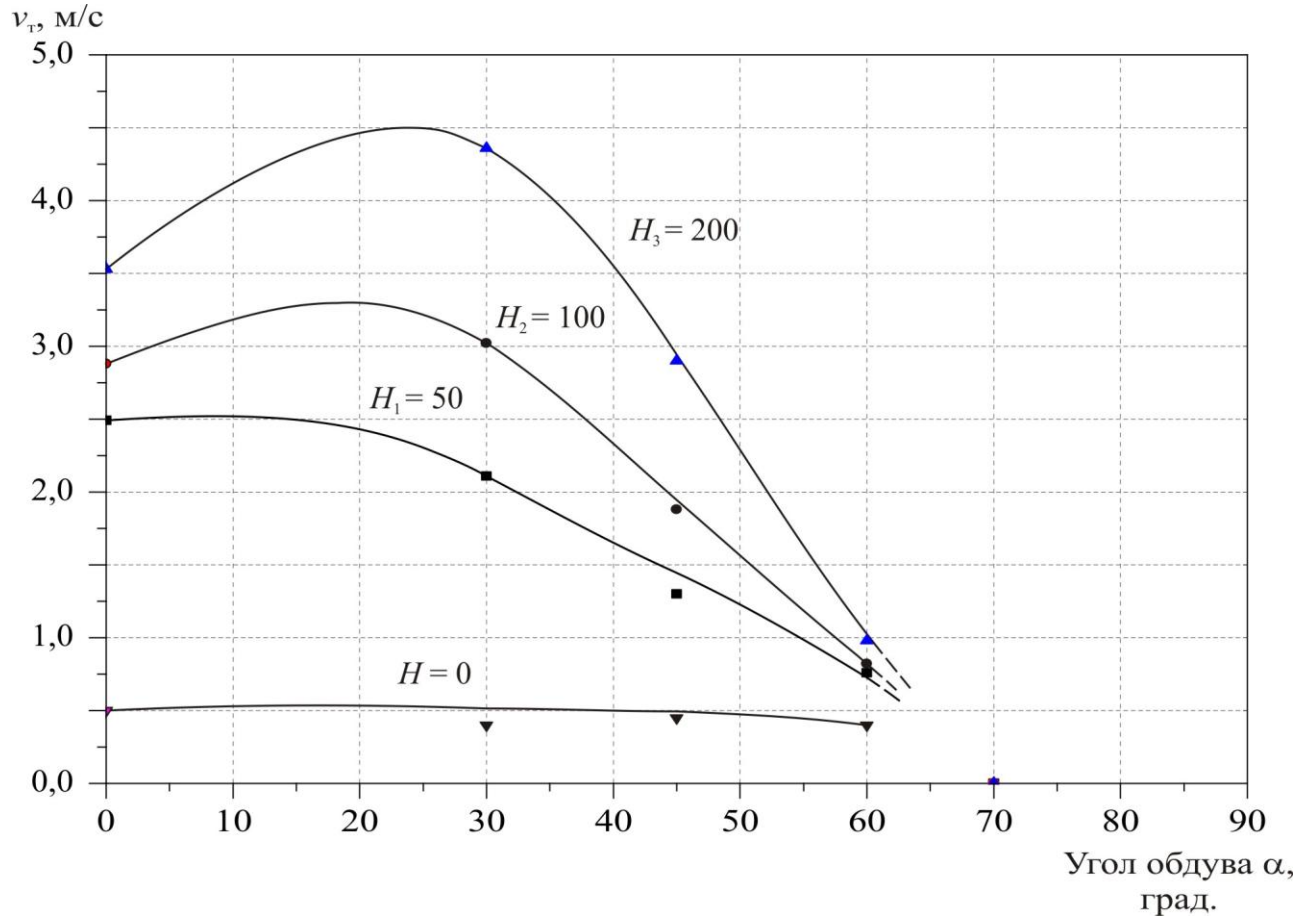


Рисунок 3.14 – Аэродинамические характеристики модели перехода со сплошными препятствиями высотой H, мм

Таблица 3.5. – Средние скорости и расходы воздуха в модели перехода при наличии препятствий

Высота и тип препятствия H, мм	Угол обдува α, град.	Средняя скорость $v_т$, м/с	Средний расход воздуха $L_т$, м^3/ч
Сплошное, H_1 = 50 мм	0 (А)	2,49	4,03
	30 (Б)	2,11	3,41
	45 (В)	1,30	2,11
	60 (Г)	0,76	1,22
Сплошное, H_2 = 100 мм	0 (А)	2,88	4,67
	30 (Б)	3,02	4,89
	45 (В)	1,88	3,04
	60 (Г)	0,82	1,33
Сплошное, H_3 = 200 мм	0 (А)	3,53	5,72
	30 (Б)	4,36	7,06
	45 (В)	2,90	4,70
	60 (Г)	0,98	1,59
Сетчатое, H_1 = 50 мм	0 (А)	1,96	3,18
	30 (Б)	1,33	2,15
	45 (В)	0,81	1,31
	60 (Г)	0,65	1,05
Сетчатое, H_2 = 100 мм	0 (А)	2,47	4,00
	30 (Б)	2,08	3,37
	45 (В)	1,52	2,47
	60 (Г)	0,79	1,28
Сетчатое, H_3 = 200 мм	0 (А)	2,59	4,19
	30 (Б)	2,29	3,72
	45 (В)	1,70	2,75
	60 (Г)	1,35	2,19

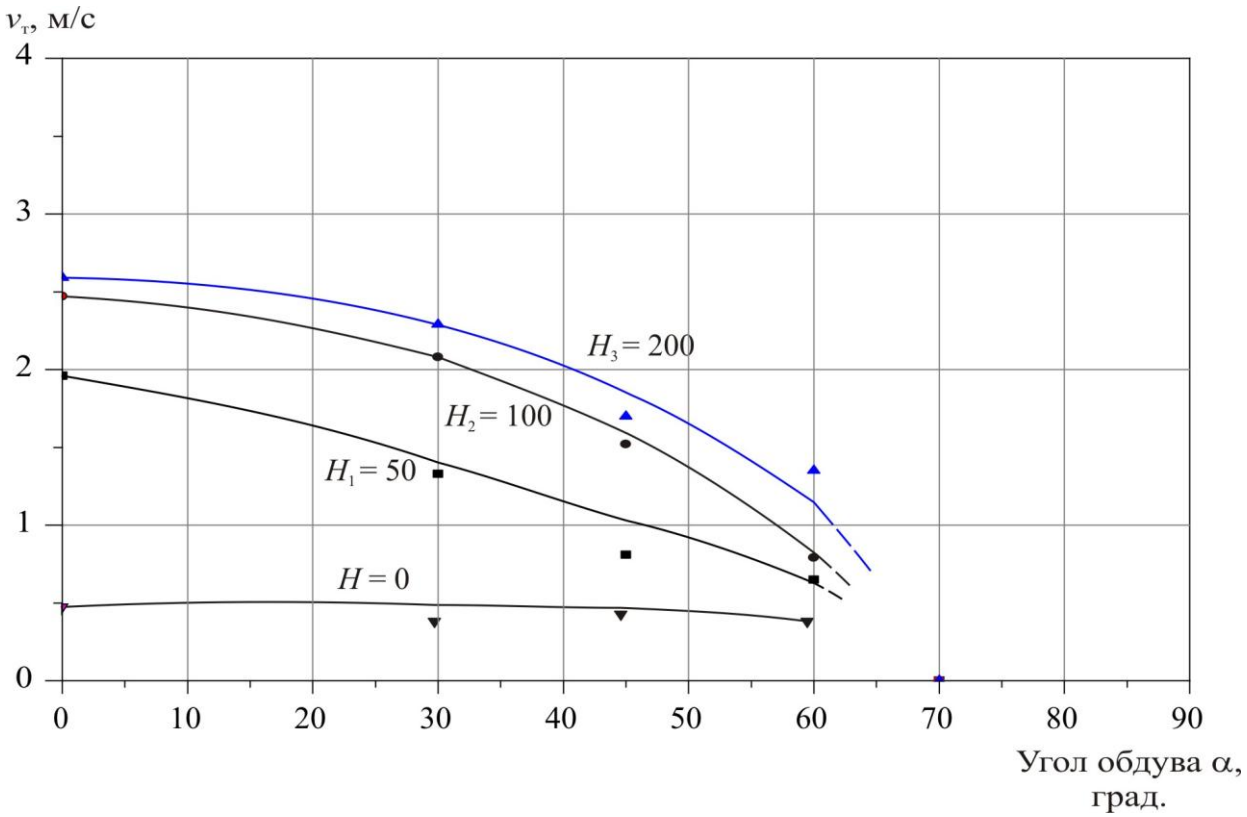


Рисунок 3.15 – Аэродинамические характеристики модели перехода с сетчатыми препятствиями высотой Н, мм

С увеличением высоты сплошного препятствия скорость воздуха в тоннеле перехода возрастает, что особенно выражено при углах обдува до 45°. Установка сетчатых препятствий также положительно отражается на уровне воздухообмена в переходе, но в меньшей степени по сравнению со сплошными препятствиями.

3.2.5. Аналитическое представление результатов исследований

Графические зависимости скоростей воздуха в тоннелях пешеходных переходов $v_т$, м/с, от угла обдува α, град, при различных скоростях ветра и наличии или отсутствии внешних препятствий аппроксимированы в виде полиноминального уравнения четвертой степени с помощью программного комплекса *OriginPro 8.1*:

$$v_т = a\alpha^4 + b\alpha^3 + c\alpha^2 + d\alpha + e. \qquad (3.22)$$

Аналитические значения коэффициентов *a, b, c, d, e* для различных режимов работы аэродинамической трубы, при отсутствии и различных видов внешних препятствий приведены в таблице 3.6. Графическое изображение полученных аналитических зависимостей показано на рисунке 3.16.

Таблица 3.6. – Показатели полиноминального уравнения (3.22)

Препятствие	Режим работы	*a*	*b*	*c*	*d*	*e*
отсутствует	I	−2,69E−08	−2,709E−06	−0,000108	0,00125	0,559
	II	−3,7E−09	3,966E−07	0,000008	−0,00075	0,54
	III	−1,72E-08	1,863E−06	−0,00008	0,00164	0,27
	IV	−9,7E−09	8,455E−07	−0,000025	0,00001	0,221
Сплошное, H_3 = 200 мм	I	−2,297E−07	−2,709E−05	−0,007546	0,18987	3,502
	II	−3,11E−08	0,00001476	−0,001678	−0,04456	0,878
	III	0	3,7284E−0,6	−0,000562	0,01612	0,388
	IV	0	2,2305E−67	−0,00034	0,00958	0,222
	V	0	1,3498E−0,6	0,000203	0,00583	0,139
Сплошное, H_2 = 100 мм	I	−2,157E−07	0,00006146	0,005503	0,12033	2,881
	II	2,54E−08	0,000000217	−0,000396	−0,01103	0,711
	III	0	2,4198E−06	−0,000354	0,00871	0,327
	IV	0	1,1358E−06	−0,000169	0,00403	0,15679
	V	0	6,831E−07	−0,000102	0,00241	0,113
Сплошное, H_1 = 50 мм	I	−2,664E−07	5,914E−05	−0,004346	0,06941	2,498
	II	−5,36E-08	1,2655E-05	−0,00096	−0,01599	0,625
	III	0	8,477E−07	−0,000122	0,00107	0,276
	IV	0	4,774E−07	−0,000069	0,00061	0,156
	V	0	2,798E−07	−0,00004	0,00027	0,099
Сетчатое, H_3 = 200 мм	I	−1,377E-07	3,0542E−05	−0,002406	0,04021	2,612
	II	−4,09E-08	8,4729E-06	−0,000622	−0,00987	0,652
	III	0	3,786E−07	−0,000079	0,00082	0,287
	IV	0	1,399E−07	−0,000034	0,00017	0,16
	V	0	1,975E−07	−0,000037	0,00055	0,103
Сетчатое, H_2 = 100 мм	I	4,79E−08	−1,2121E-06	−0,000645	0,00658	2,464
	II	0,000000023	−2,0741E-06	−0,00008	−0,00032	0,62
	III	0	8,971E−07	−0,000135	0,00185	0,273
	IV	0	4,691E−07	−0,000071	0,0009	0,153
	V	0	2,716E-07	−0,000041	0,00044	0,097
Сетчатое, H_1 = 50 мм	I	4,26E−08	8,2529E−06	−0,000484	−0,01399	1,958
	II	−4,32E-08	8,0314E−06	−0,000461	0,00246	0,49
	III	0	6,58E−08	−0,000007	−0,00236	0,218
	IV	0	0	0,000001	−0,00146	0,122
	V	0	−8,2E−09	0,000002	−0,00096	0,077

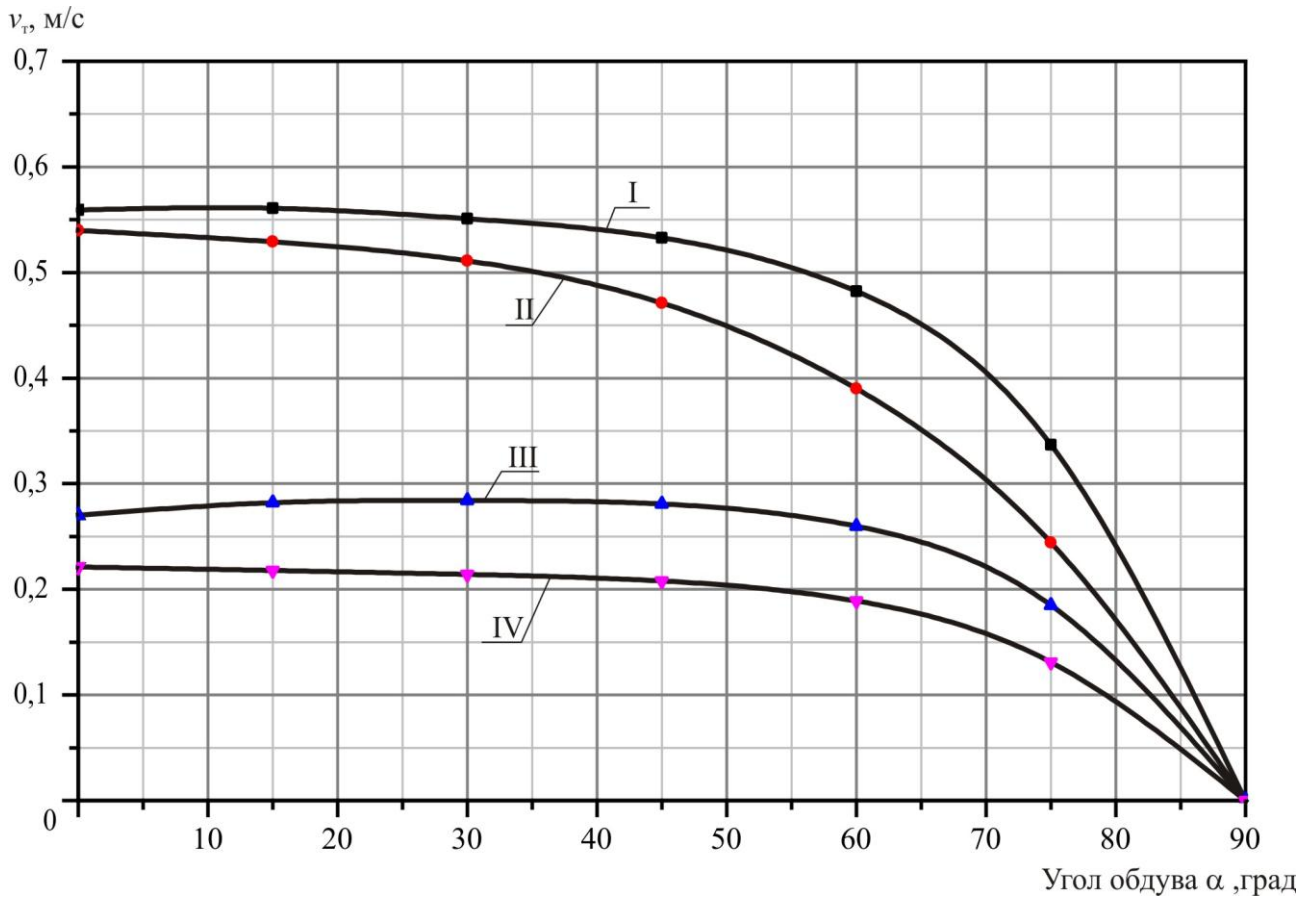


Рисунок 3.16 – Скорости воздуха в тоннеле модели перехода по зависимости (3.22): режим I – $v_{оср} \approx 7{,}0$ м/с, режим II – $v_{оср} \approx 3{,}5$ м/с, режим III – $v_{оср} \approx 2{,}5$ м/с, режим IV – $v_{оср} \approx 1{,}5$ м/с.

3.3. Натурные исследования интенсивности естественного воздухообмена переходов

Натурные замеры интенсивности воздухообменов проводились в двух тоннелях подземных пешеходных переходов под автомобильными дорогами, близких по объемно-планировочным решениям к исследованному на модели, в холодный и теплый периоды года в г. Тольятти.

На порталах переходов отсутствовали двери или турникеты. Поперечное сечение тоннеллей 2,9(h) х 5,6 м, в них отсутствовали какие-либо дополнительные строения. Над тоннелями переходов отсутствовали какие-либо препятствия, вблизи отсутствовали высокие здания.

При натурных исследованиях одновременно проводились замеры: направления и скорости ветра; скорости и направления движения воздуха в тоннелях и входах-выходах переходов. Замеры проводились крыльчатым анемометром, в хо-

лодный период года при контроле температуры воздуха дополнительно использовался термоанемометр testo 425 (№ 02513228).

Результаты натурных замеров подвижности воздуха в тоннелях сопоставлены с лабораторными значениями скоростей в модели перехода и нанесены на график (рисунок 3.17). Скорости воздуха в тоннеле модели $v_т$, м/с, и в реальных переходах (отмеченные на графике конкретными точками) находятся в одном численном диапазоне (заштрихованная область) при сопоставимых скоростях обдува модели и направления атмосферного воздуха. На рисунке 3.18 режим I соответствует скорости воздуха на рабочей площадке аэродинамической трубы $v_{оср} \approx$ 7,0 м/с, режим II – скорости $v_{оср} \approx$ 3,5 м/с, режим III – скорости $v_{оср} \approx$ 2,5 м/с, режим IV – скорости $v_{оср} \approx$ 1,5 м/с.

Полученные результаты имеют высокую сходимость с результатами аналогичных экспериментов, проводимых в г. Нижний Новгород [267].

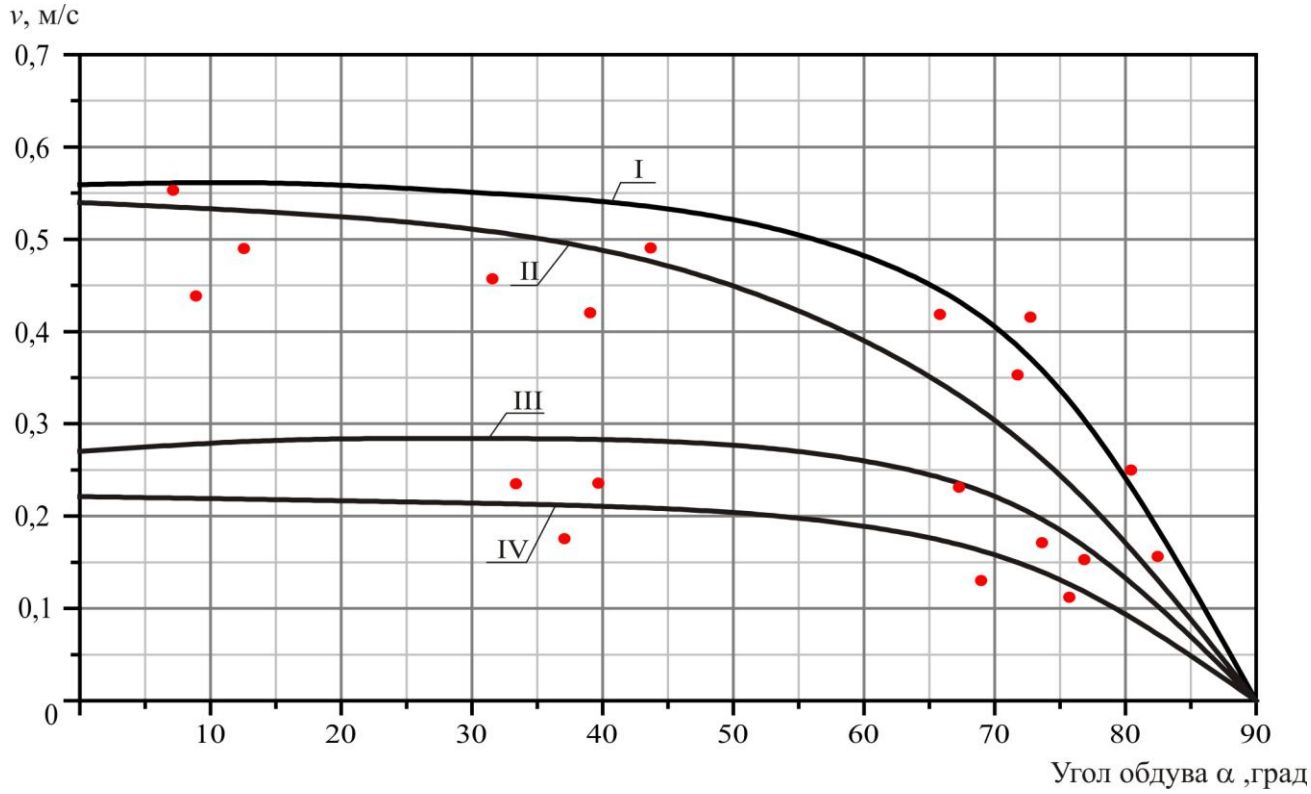


Рисунок 3.17 – Сопоставление натурных и лабораторных исследований интенсивности воздухообменов в тоннелях переходов

3.4. Коэффициент обеспеченности воздухообмена в тоннелях подземных пешеходных переходов при естественной вентиляции

Приведенные выше теоретические, экспериментальные лабораторные и натурные исследования показали, что единственным побудителем движения воздуха по тоннелям подземных пешеходных переходов I типа в круглогодичном цикле эксплуатации является ветровое давление Δp_v. Величина Δp_v изменяется от нуля при безветрии до конкретной максимальной величины в зависимости от скорости ветра, угла между осью тоннеля и направлением ветра в рассматриваемый момент, от наличия естественных или искусственно созданных внешних сплошных или воздухопроницаемых препятствий, способствующих повышению градиента ветрового давления путем увеличения аэродинамического коэффициента c_v.

Для количественной оценки эффективности естественной вентиляции тоннелей пешеходных переходов за счет ветрового давления принят коэффициент обеспеченности воздухообменов $К_{об}$, величина которого показывает долю общего числа случаев, не допускающих отклонение от расчетных условий [27]:

$$К_{об} = \frac{(N - n)}{N}. \qquad (3.23)$$

где N – общее число случаев; n – число случаев отклонения условий от расчетных.

Исходными данными для определения максимального значения величины $К_{об}$ являются: скорость ветра $v_{ветр}$, м/с, в холодный (январь) и в теплый (июль) периоды года; повторяемость направлений ветра, %; ориентация по сторонам света оси тоннеля перехода. Углом обдува α, град., является угол между осью тоннеля подземного пешеходного перехода и соответствующим направлением ветра.

По имеющимся экспериментально или аналитически полученным зависимостям для переходов I типа по значениям скорости ветра $v_{ветр}$ и угла обдува α определяется скорость движения воздуха в тоннеле $v_т$. Расход воздуха в тоннеле $L_т$, м^3/ч, определялся по формуле (3.15).

Минимальный допустимый расход воздуха в тоннеле реального перехода может задаваться двумя путями. Первый путь включает в себя определение ми-

нимального расхода воздуха для жизнеобеспечения людей $L_л$, м^3/ч, при проектной пропускной способности перехода $z_л$, чел/ч. Тогда $L_л = l_{уд} \cdot z_л$, где $l_{уд}$ – минимально допустимый удельный расход для жизнеобеспечения человека, $l_{уд}$ = 2,0 м^3/(чел·ч). По второму пути за расчетную принимается подвижность воздуха в тоннеле $v_т$ = 0,2 м/с. Расход воздуха в тоннеле находится по (3.15). Выбирается больший из полученных воздухообменов в переходе. Нами принят второй метод.

Расход воздуха в тоннеле составляет $L_т$ = 0,2·3·6·3600 = 12 960 м^3/ч.

Рассчитанные аналитически на основе экспериментальных данных максимальные значения коэффициентов обеспеченности воздухообменов в тоннеле подземных пешеходных переходов I типа $К_{об}$, доли, за счет естественной вентиляции при расчетной скорости и повторяемости ветра в январе и июле месяцах приведены в приложении 5.

С учетом розы ветров для г. Нижнего Новгорода получены графоаналитические зависимости коэффициентов $К_{об}$, доли, обеспеченности естественных воздухообменов в переходах в июле и январе месяцах с учетом изменения скорости ветра по румбам [251]. Изучаемые подземные переходы имеют приведенное выше относительно простое объемно-планировочное решение, не имеют внешних препятствий у порталов. Расчетный расход воздуха в тоннелях принят равным $L_т$ = 12 960 м^3/ч при подвижности воздуха $v_т$ = 0,2 м/с. На рисунках 3.18…3.21 приведены графические зависимости значения величины $К_{об}$ естественных воздухообменов при ориентации оси тоннелей С–Ю, В–З, СВ–ЮЗ, СЗ–ЮВ для теплого и холодного периодов года [33].

Обобщенные значения коэффициентов $К_{об}$ для июля и января месяцев сведены в таблицу 3.7 и показаны на рисунке 3.22.

Таблица 3.7. − Коэффициент обеспеченности естественного воздухообмена $К_{об}$, доли, для г. Нижнего Новгорода

Период года	Ориентация оси тоннеля			
	С–Ю	В–З	СВ–ЮЗ	СЗ–ЮВ
Теплый (июль)	0,68	0,76	0,78	0,74
Холодный (январь)	0,81	0,8	0,86	0,77

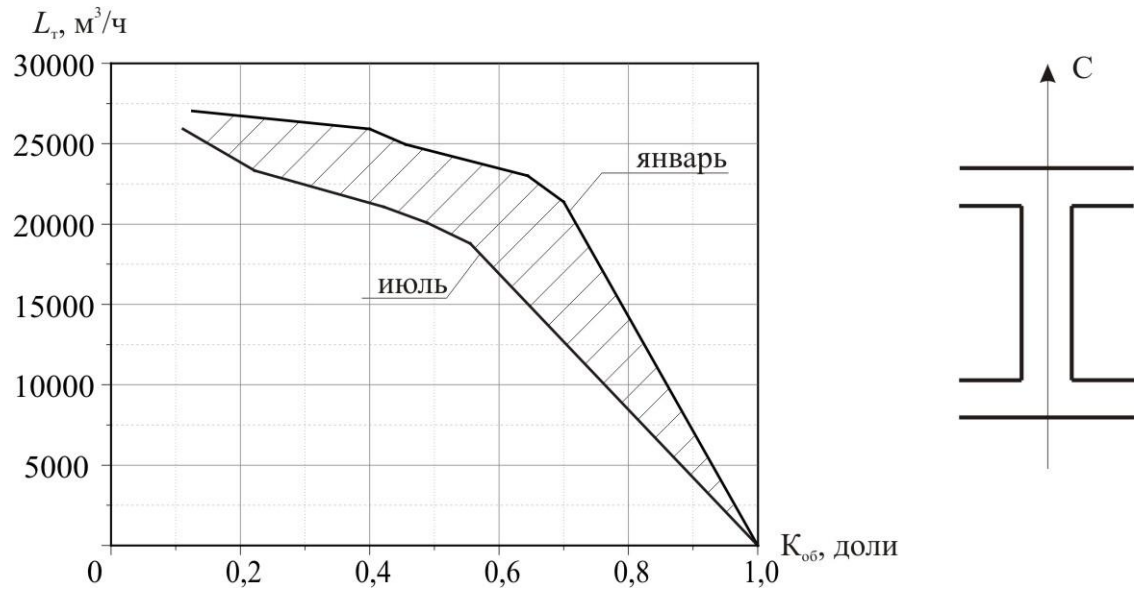


Рисунок 3.18 – Обеспеченность воздухообмена при ориентации оси тоннеля С–Ю

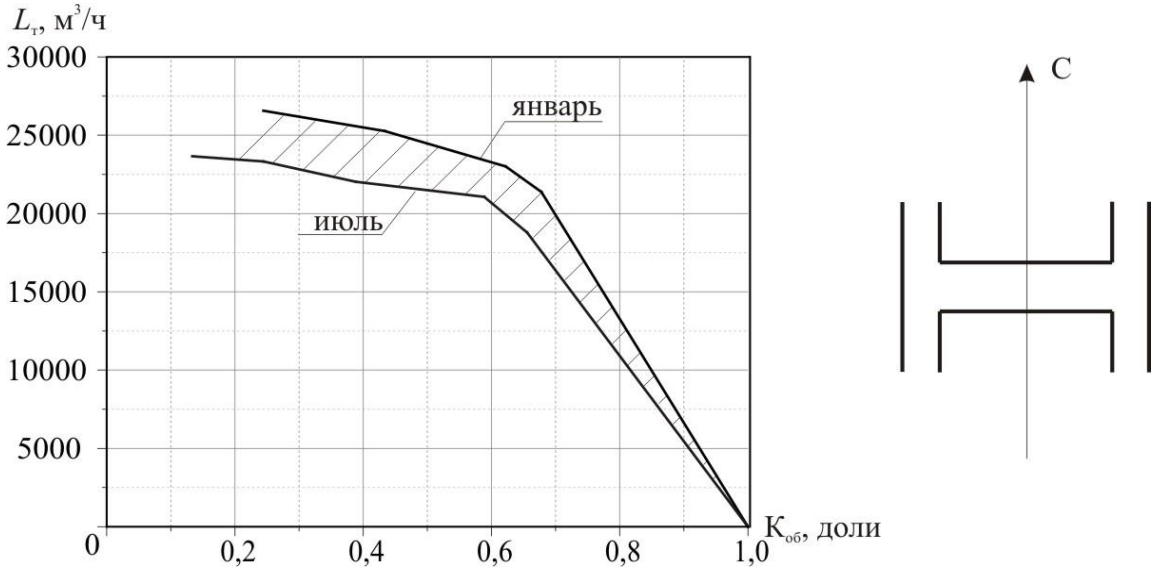


Рисунок 3.19 – Обеспеченность воздухообмена при ориентации оси тоннеля В−З

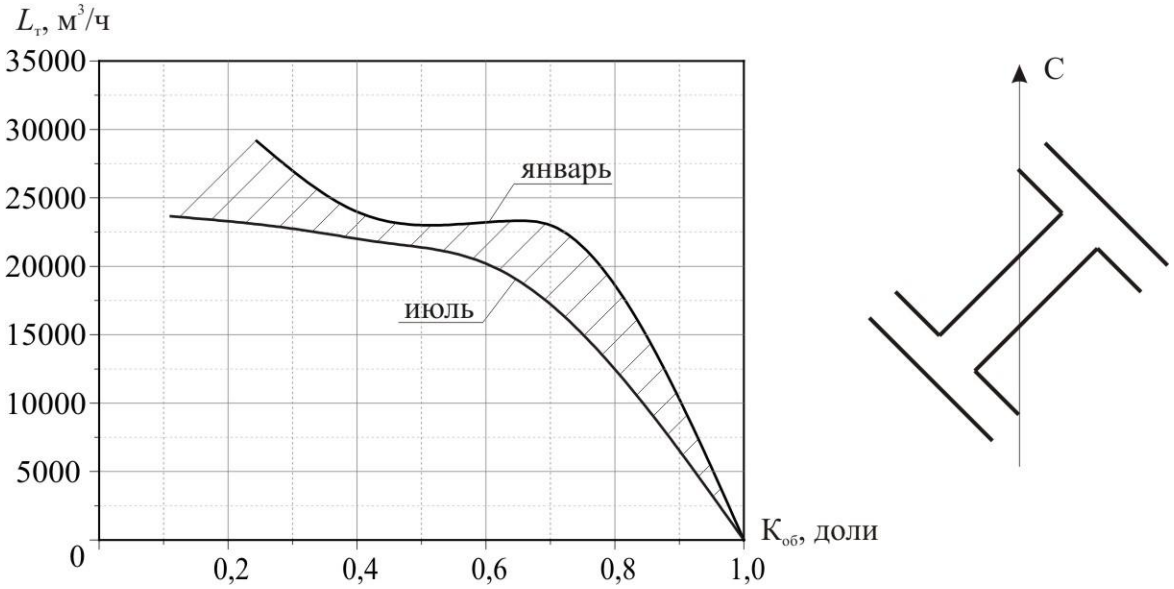


Рисунок 3.20 – Обеспеченность воздухообмена при ориентации оси тоннеля СВ−ЮЗ

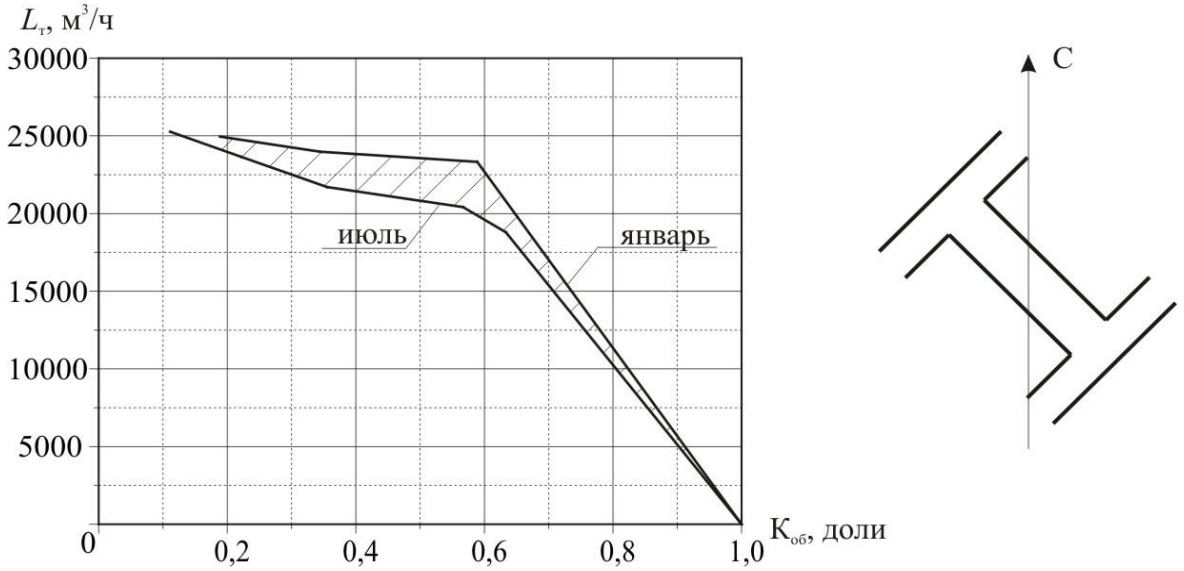


Рисунок 3.21 – Обеспеченность воздухообмена при ориентации оси тоннеля СЗ−ВЗ

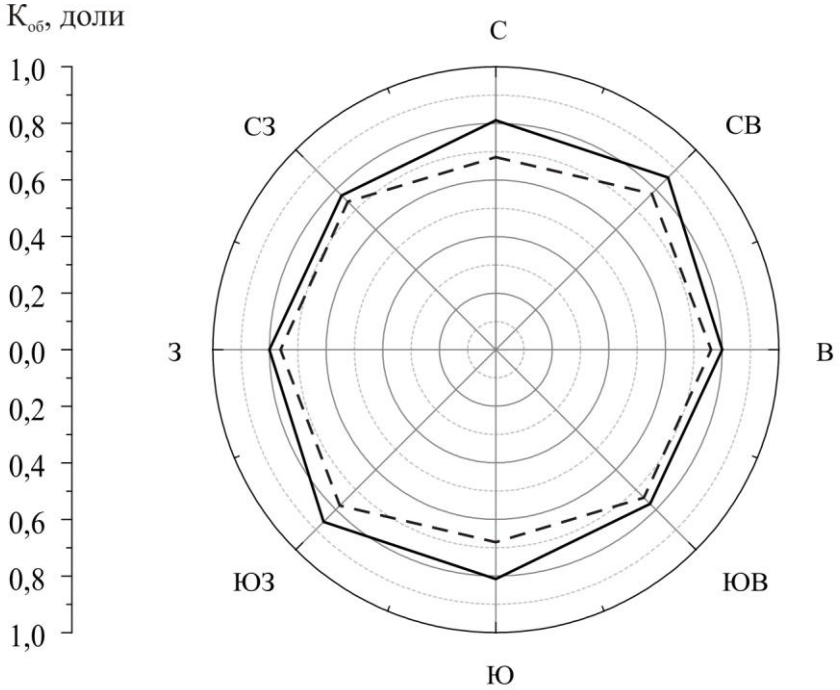


Рисунок 3.22 – Обеспеченность воздухообмена при расположении оси тоннеля по сторонам света: ——— в январе; - - - - - в июле

Результаты аналогичных исследований коэффициентов обеспеченности воздухообменов в тоннеле подземных пешеходных переходов I типа $К_{об}$, доли, за счет естественной вентиляции для климатических условий г. Тольятти представлены в приложении 6.

3.5. Практические рекомендации по повышению обеспеченности параметров микроклимата в подземных пешеходных переходах

Анализ данных лабораторных и натурных исследований (раздел 3.2.4, 3.2.6) показал, что установка препятствий у входов-выходов тоннеля подземного пешеходного перехода способствует повышению скорости воздуха в тоннеле перехода, и, как следствие сужает область вероятного отсутствия естественного воздухообмена под действием силы ветра (рисунок 3.23).

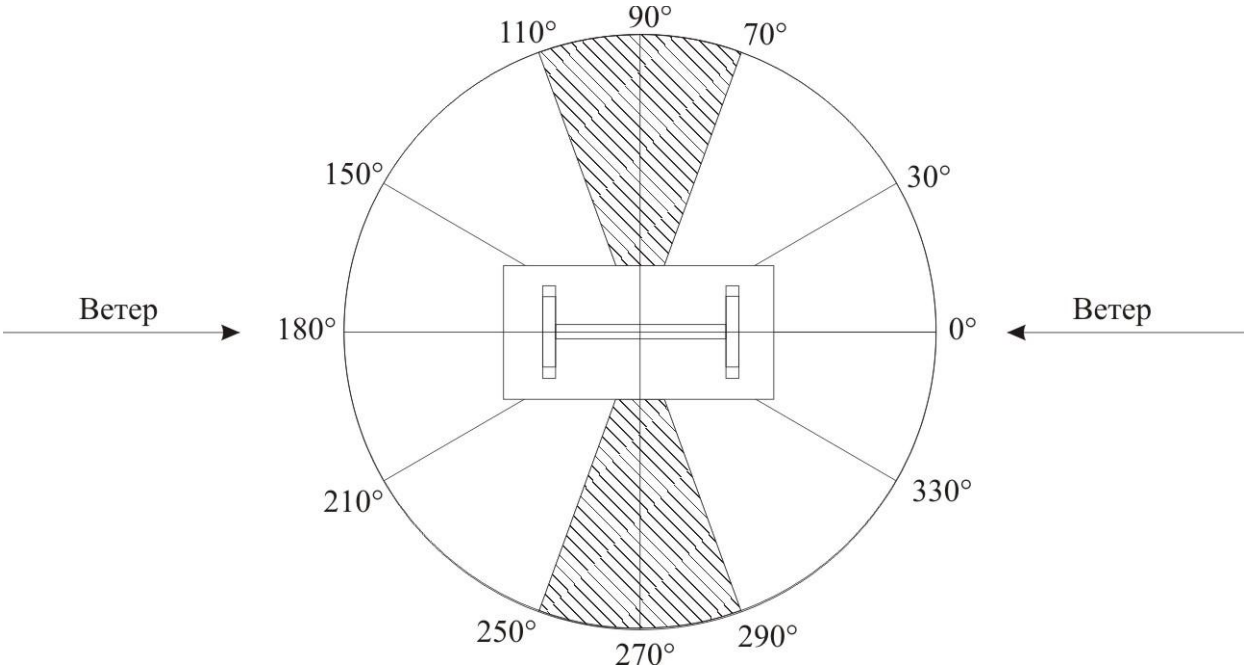


Рисунок 3.23 – Максимальная эффективность естественной вентиляции за счет ветрового давления при различных углах обдува относительно оси модели при наличии внешних препятствий

Нами была проведена оценка повышения обеспеченности воздухообмена в тоннелях подземных пешеходных переходов при наличии внешних препятствий.

В качестве примера, на рисунках 3.24 и 3.25 показана обеспеченность естественного воздухообмена при наличии внешнего сплошного препятствия $\bar{h}_{спл} = 2{,}86$ для климатический условий г. Нижний Новгород.

Наличие внешних естественных или установка искусственных внешних препятствий (рис. 3.3) для возможного увеличения (до 3,0…4,0 раз) поступающего в тоннель воздуха в реальных условиях рационально и возможно только в исключительных случаях. В то же время такое довольно сложное инженерное со-

оружение не может стабильно увеличить коэффициент обеспеченности $K_{об}$ из-за переменных значений скорости и направления ветра. Возведение более сложных по объемно-планировочным решениям пешеходных переходов по сравнению с исследованными I типа сопровождается снижением величины естественного воздухообмена и, соответственно, максимальной величины коэффициента обеспеченности, приведенного в таблице 3.7.

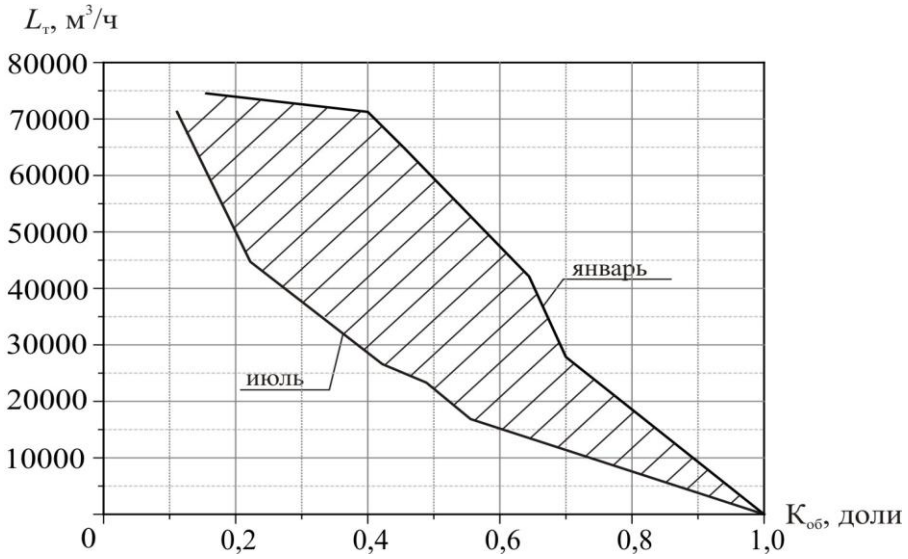


Рисунок 3.24 – Обеспеченность воздухообмена при ориентации оси тоннеля С–Ю и наличии внешнего сплошного препятствия $\overline{h}_{спл} = 2{,}86$

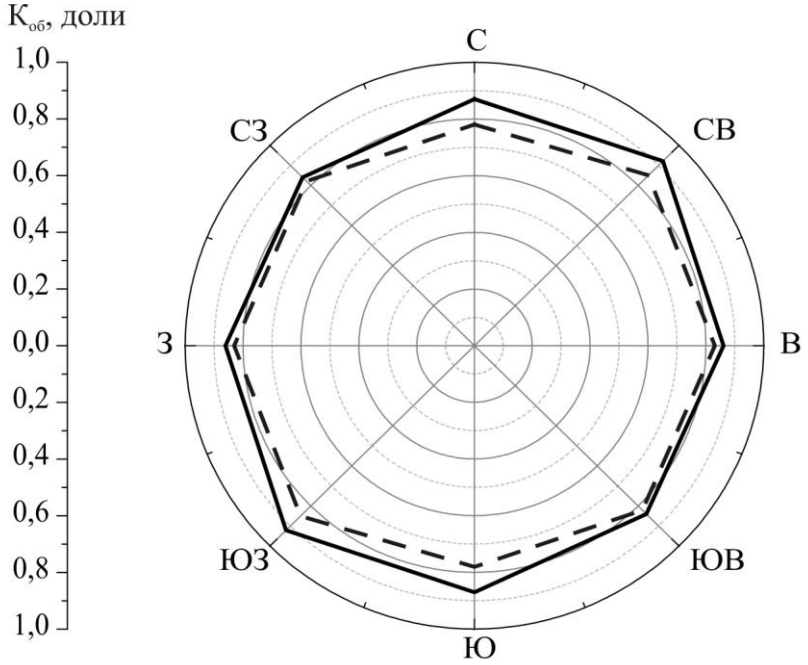


Рисунок 3.25 – Обеспеченность воздухообмена при расположении оси тоннеля по сторонам света: ——— в январе; – – – в июле

Для оценки эффективности естественной вентиляции пешеходного перехода в круглогодичном цикле эксплуатации необходимо производить расчет воздухообмена как для холодного, так и для теплого периодов года.

Исходными данными для расчета являются: преобладающие направления и скорости ветра $v_в$ в январе и июле, ориентация по сторонам света оси тоннеля перехода.

Углом обдува α является угол между осью тоннеля подземного пешеходного перехода и преобладающим направлением ветра.

По зависимостям (таблица 3.6) по значению скорости ветра $v_в$ и угла обдува α определяем скорость движения воздуха в тоннеле $v_т$. Расход воздуха в тоннеле $L_т$, м^{3}ч определяется по формуле (3.15).

Необходимый из условия обеспечения санитарно-гигиенической нормы воздухообмен $L_{сн}$, м^3/ч, при проектной проходимости z, чел, определяется по формуле:

$$L_{сн} = l_{уд} \cdot z, \qquad (3.24)$$

где $l_{уд}$ – минимально допустимый удельный расход для жизнеобеспечения человека, $l_{уд}$ = 2,0 м^3/(чел·ч).

Если расчетный воздухообмен за счет ветрового давления $L_т$ недостаточен для обеспечения санитарной нормы, т.е. $L_т < L_{сн}$, то необходимо определить минимальные параметры препятствий, располагаемых между входами-выходами.

Из условия обеспечения требуемого воздухообмена определяется расчетная требуемая скорость в тоннеле $v_т'$:

$$v_т' = \frac{L_{сн}}{F_т \cdot 3600} \qquad (3.25)$$

В зависимости от направления угла обдува α, скорости воздуха $v_т'$ в тоннеле, архитектурно-планировочных характеристик перехода оценивается наличие либо отсутствие эжекции на входах-выходах и соответствующие направления движения воздуха.

По значению скорости ветра $v_в$, угла обдува α и скорости движения воздуха в тоннеле $v_т'$ используя зависимости (таблица 3.6) определяется тип и высота искусственного препятствия.

Следует отметить, что рассмотрена только качественно и количественно динамика воздушных потоков в тоннелях за счет ветрового давления. В холодный период года для поддержания температурного режима в тоннелях необходимо устройство на входах-выходах дверей или турникетов, что исключает их естественное вентилирование. Создание постоянных рабочих мест в подземных пешеходных переходах требует поддержания одновременно с воздушным температурного режима в холодный период года, т.е. использовать при эксплуатации подземные переходы III тип – сооружения, в помещениях которых не должно происходить значительных колебаний температуры внутреннего воздуха. В некоторых случаях (например, при наличии грунтов вод) необходимо регулировать влажностный режим переходов.

3.6. Выводы по главе 3

В разделе изучены отсутствующие в современной нормативной и справочной литературе инженерные решения и рекомендации по возможности использования в подземных пешеходных переходах постоянных рабочих мест без установки дополнительных специальных систем обеспечения допустимых параметров микроклимата. Теоретически и экспериментально определены аэродинамические характеристики переходов с целью создания в тоннелях необходимых воздухообменов при использовании только естественных источников энергии. Выявлены аэродинамические градиенты давлений, реально влияющих на интенсивность движения воздуха в подземных переходах, аналитически определены их количественные показатели.

1. Проведенные экспериментальные исследования на модели подземного пешеходного перехода в аэродинамической трубе позволили определить количественные характеристики расходов воздуха при наличии внешних препятствий потоку воздуха и их отсутствии; получить аналитические зависимости по расчету скоростей и расходов воздуха в тоннелях переходов при различных нестационарных внешних воздействиях (переменных скоростях и углах обдува модели); выявить реальные максимальные коэффициенты обеспеченности по подаче минимального количества наружного воздуха при естественных источниках энергии (ветровом давлении).

2. Прослеживается практическая сходимость экспериментальных результатов на модели с аналитическими данными, полученными по теории смешения потоков профессора П.Н. Каменева при слиянии, делении потоков и эжекции воздуха в подземных переходах.

3. Результаты натурных исследований наиболее простых по инженерным решениям подземных пешеходных переходов (I типа) сопоставлены с лабораторными значениями по скоростям в тоннелях сооружений. Количественные показатели скоростей находятся в одном численном диапазоне, что говорит о допустимости и правомочности использованной теоретическо-экспериментальной методики изу-

чения рассматриваемых нестационарных аэродинамических процессов.

4. На основе экспериментальных на модели и натурных исследований рассчитаны максимальные значения коэффициентов обеспеченности воздухообменов в тоннелях переходов I типа. Как для теплого (июль), так и для холодного (январь) периодов года они не достигают 0,9 (таблица 3.7) при естественных источниках энергии (расчетной скорости ветра в регионе) и заданной по санитарным нормам минимальной скорости воздуха в тоннеле перехода, как на постоянном рабочем месте, $v_т$ = 0,2 м/с.

5. 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.

6. Допустимые температурно-влажностные и воздушные режимы подземных пешеходных переходов при наличии в них постоянных рабочих мест необходимо проектировать как для самостоятельного класса сооружений. Обязателен учет объемно-планировочных решений и аэродинамических характеристик переходов, климатических показателей регионов, нестационарных процессов тепломассообмена между воздухом тоннелей и окружающим грунтом.

Глава 4. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМ АКТИВНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ ДЛЯ СУШКИ БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНОГО СЫРЬЯ

4.1. Термодинамическая трактовка построения линий постоянных потенциалов и процессов тепломассообмена на *I*–*d*–θ-диаграмме

4.1.1. Классическая теплофизическая модель тепломассообмена в процессе сушки растительного сырья

Обобщенная модель тепломассообмена в процессе сушки растительного сырья, получившая на практике наибольшее применение, была разработана на основе *I*–*d*-диаграммы влажного воздуха [73, 93, 188, 227].

Процессы изменения состояния воздуха, продуваемого через слой растительного сырья, на *I*–*d*-диаграмме показаны на рисунке 4.1.

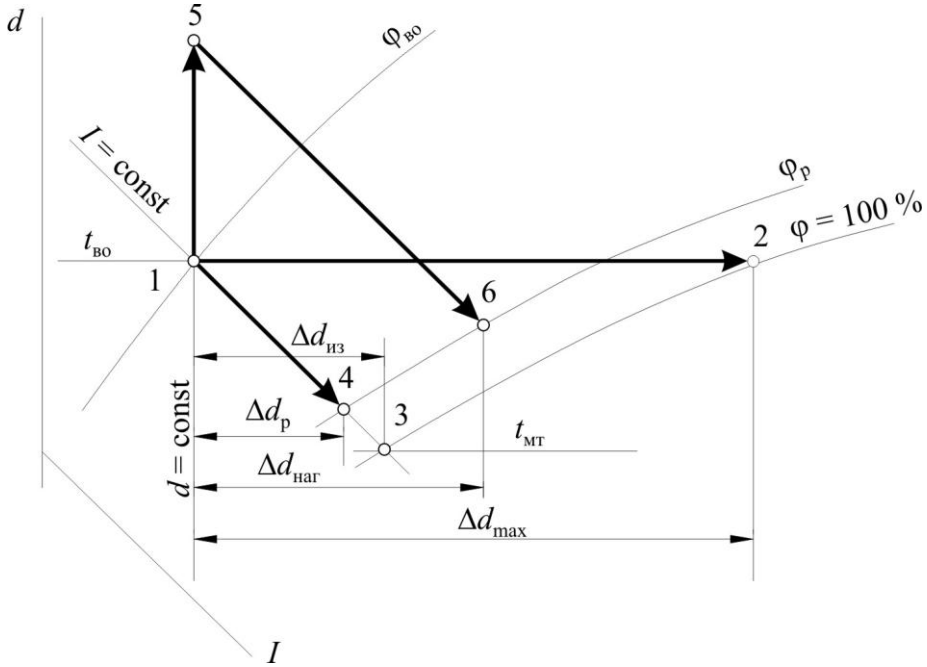


Рисунок 4.1 – Изменение состояния воздуха, продуваемого через слой сохнущей травы

Если бы на поверхности высушиваемого материала отсутствовала свободная влага, т.е. отсутствовал испарительный эффект с поверхности объекта сушки, то максимальное влагопоглощение составило бы $\Delta d_{max} = d_2 - d_1$ (луч 1–2). В действительности процесс поглощения влаги идет по изоэнтальпе (I = const). Насыщение воздуха влагой до $\varphi \approx 100$ % (луч 1–3) возможно при влагосодержании выше гигроскопического, $\Delta d_{из} = d_3 - d_1$. В гигроскопической области увлажнение

воздуха происходит до наступления состояния термодинамического равновесия с сырьем, т.е. до достижения воздухом равновесной влажности $\varphi_р$ (луч 1–4), $\Delta d_р = d_4 - d_1$. Увеличение сорбционной способности воздуха возможно за счет повышения его начальной температуры (луч 1–5), $\Delta d_{наг} = d_6 - d_5$.

Однако такое построение не учитывает влияние на процесс тепломассообмена биологической теплоты от дыхания сырья. Для построения процессов обработки воздуха с учетом указанных требований необходимо рассмотреть направления тепло- и массопереноса в слое сохнущего материала (рисунок 4.2).

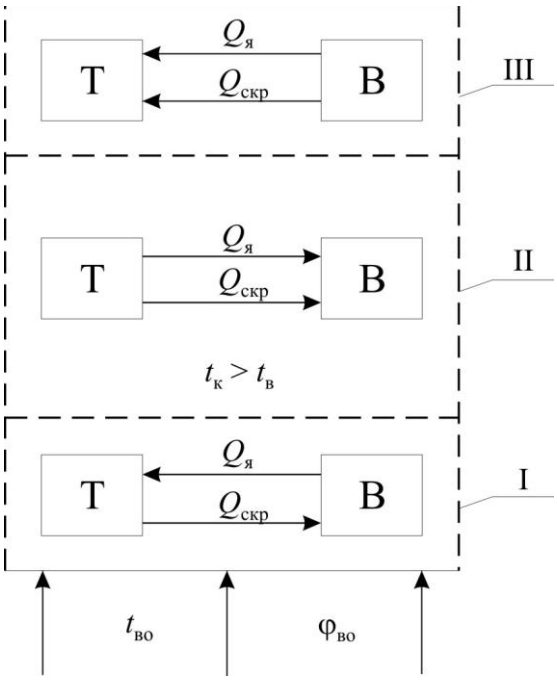


Рисунок 4.2 – Направления тепло- и массопереноса в слое сохнущей травы при $t_к > t_{во}$
I – слой активно сохнущей травы (корректирующий); II – основной слой;
III – поверхностный слой; Т – трава; В – воздух

При начальной влажности сырья выше гигроскопической ($w_{рс} > w_г$) механизм влагообмена аналогичен процессу испарения с открытой поверхности воды. Воздух увлажняется по изоэнтальпе *AG* до равновесной относительной влажности $\varphi_р$ (рисунок 4.3). Биологические тепловыделения нарушают адиабатность процесса, смещая луч насыщения воздуха от линии I = const (процесс *AB*). Увеличение ассимилирующей способности воздуха Δd_g пропорционально предварительному подогреву воздуха на $\Delta t_{во}$ (процесс AA_1), что может быть описано балансовым уравнением:

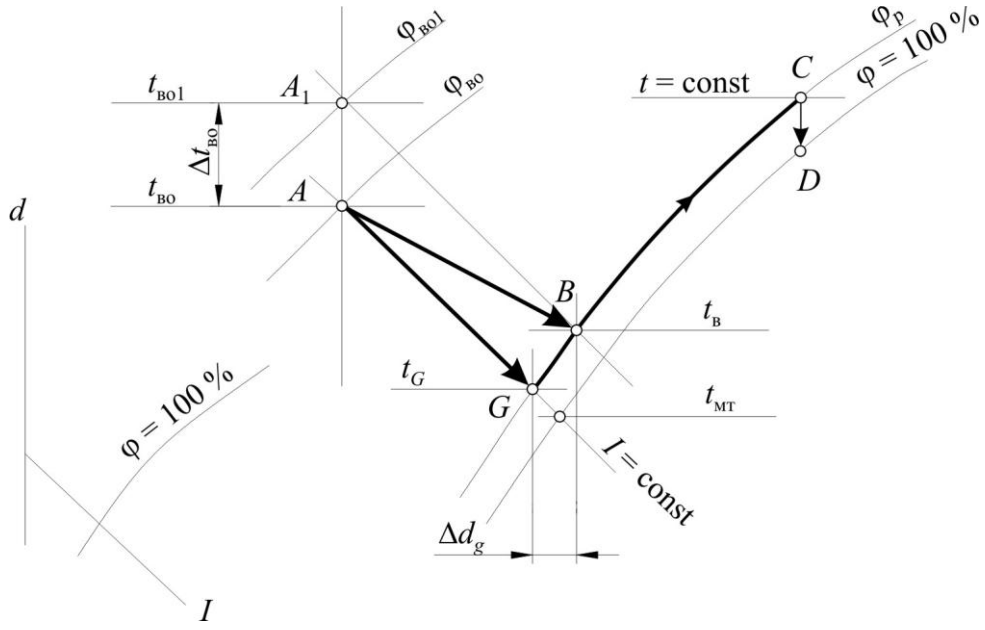


Рисунок 4.3 – Изображение на *I–d*-диаграмме влажного воздуха изменения состояния воздуха в слое сохнущей травы при $t_к > t_{во}$

$$G_к(c_{тр}\Delta t_{во} + q_v) = \Delta d_g L_в \rho_в r\,, \qquad (4.1)$$

где $G_к$ – масса корректирующего слоя растительного сырья.

В процессе сушки слой активно сохнущего сырья перемещается по направлению движения воздуха, наблюдается углубление зоны испарения в слое. Снижение влажности поверхностного слоя ниже гигроскопической обусловливает уменьшение интенсивности влагообмена, т.е. процесс переходит в период падающей скорости сушки. Момент наступления гигроскопического равновесия между объектом сушки и сушильным агентом определяется изотермами сорбции-десорбции (рисунок 1.32).

Характер изменения состояния воздуха в корректирующем слое материала, влажность которого ниже гигроскопической ($w_{рс} \le w_г$), отличается от рассмотренного выше. Если разделить первый по ходу воздуха слой на несколько зон (рисунок 4.4, а) и условно считать, что изменение параметров сушильного агента в процессе сушки происходит скачкообразно в центре каждой зоны, а интенсивность биологических тепловыделений постоянна и равномерна, то процессы поглощения влаги воздухом на *I–d*-диаграмме будут выглядеть, как показано на рисунке 4.4, б. Согласно принятым допущениям, в нулевой зоне параметры воздуха остаются неизменными (т. *A*), в первой зоне воздух охлаждается и увлажняется до

значения $\varphi_{р1}$ (процесс *A11′*), во второй – до $\varphi_{р2}$ (процесс *A22′*) и так далее. В последней зоне температура воздуха достигает значения $t_G \approx t_{мт}$, а относительная влажность величины $\varphi_р$ (процесс *AGB*). Таким образом, поскольку изменение теплофизических свойств воздуха в реальном слое происходит относительно равномерно, результирующий процесс идет по прямой *AB*, что соответствует ранее представленным построениям (рисунок 4.3).

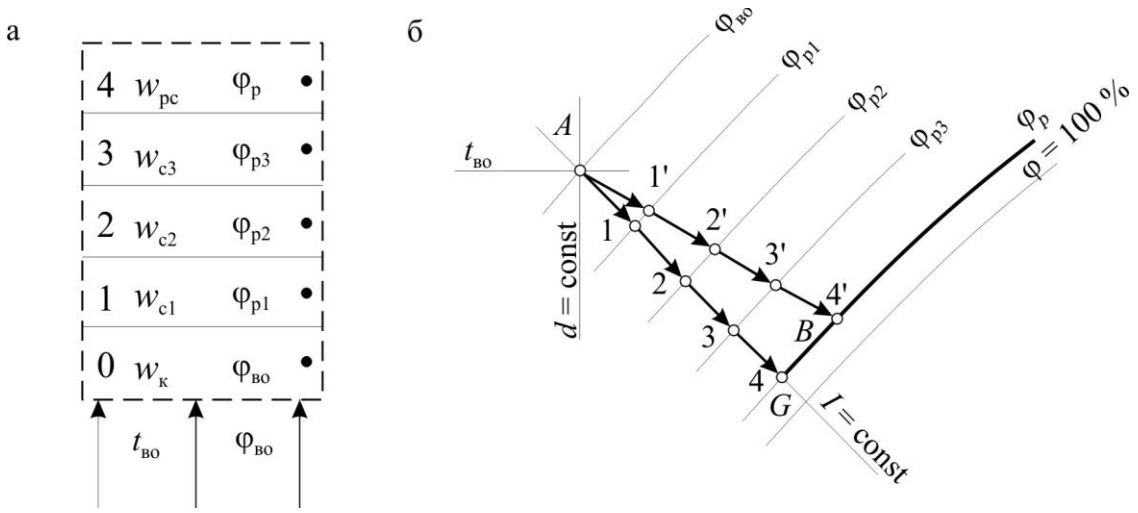


Рисунок 4.4 – Изменение состояния воздуха в слое травы при $w_{тр} < w_г$:
а – деление слоя на зоны; б – изображение процессов на *I*-*d*-диаграмме влажного воздуха

Некоторые исследователи при оценке процессов тепло- и массообмена в слое материала с влажностью $w_{рс} > w_г$, основываясь на положениях психометрической теории, допускается возможность насыщения воздуха влагой до φ = 100% [52, 180, 227]. Однако такой подход не учитывает биологическую активность сырья при дыхании.

Процесс изменение состояния воздуха в основном слое сохнущего растительного сырья показан на рисунке 4.5. Используя собственную ассимилирующую способность, воздух с параметрами точки «*a*» насыщается влагой, достигая значения φ = 100 % (процесс *ac*). В тоже время теплота самосогревания за счет повышения температуры продувочного воздуха дополнительно увеличивает его сорбционный потенциал на $\Delta d = d_d - d_c$ (процесс *ab*). В результате относительная влажность воздуха будет определяться положением точки *a′* на *I*–*d*-диаграмме. В результате дальнейших построений получаем линию $aa'a''...a^n$, описывающую реальный процесс изменения состояния воздуха в основном слое сырья.

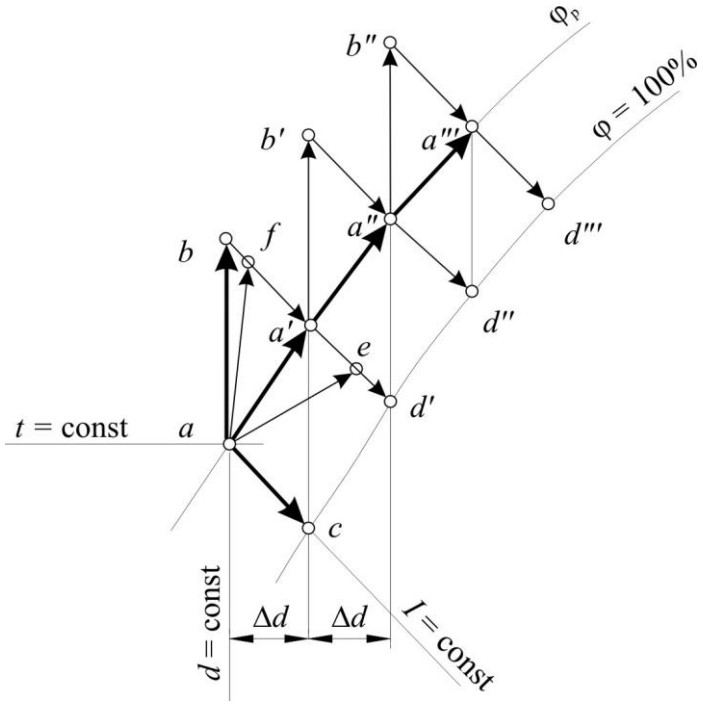


Рисунок 4.5 – Изменение состояния воздуха в основном слое штабеля сохнущей травы

Следует отметить, что кривая $aa'a''...a^n$ представляет собой кривую равновесной относительной влажности $\varphi_р$ = const, эквидистантную кривой φ = 100 %.

Представленные построения наглядно показывают несоответствие психометрической теории реальным процессам при сушке биологически активного сырья и подтверждают невозможность достижения значения равновесной относительной влажности воздуха 100 %. Необходимо уточнить, что увеличение по какой-то причине первоначального сорбционного потенциала воздуха Δd, т.е. линия $\varphi_р$ отклонится влево, неизбежно приведет к увеличению интенсивности испарения и, соответственно, к восстановлению гигроскопического равновесия, процесс вернется на линию $\varphi_р$ = const. Таким образом, гипотетические процессы *af* и *ae* не могут иметь место, противореча физической сущности процессов тепломассообмена в основном слое сохнущего растительного сырья.

Все выше сказанное представлено в виде процесса *BC* (рисунок 5.3), показывающего, что в основном слое сохнущего биологического материала ассимиляция влаги воздухом происходит даже при $\varphi_р \to 100\%$.

На практике зачастую имеют место случаи, когда температура поверхностных слоев сохнущего сырья оказывается ниже температуры внутренних слоев (например, при отключенной вентиляции). Тогда при включении системы актив-

ной вентиляции возникает III слой (рисунок 4.2), где происходит охлаждение воздуха, что может привести к конденсации влаги (процесс *CD* на рисунок 4.3), т.е. увлажнению поверхностного слоя сохнущего материала.

Предварительный искусственный подогрев продувочного воздуха на величину Δt принципиально не меняет направлений процессов тепломассообмена в слое (при условии, что начальная температура продувочного воздуха выше конечной $t_{во} > t_к$) (рисунок 4.6). Биологические тепловыделения и аккумулированная теплота ($Q_б + Q_{ак}$) отклоняют процесс от изоэнтальпы на величину, равноценную предварительному подогреву воздуха на $\Delta t_{во}$. В тоже время необходимо учесть,

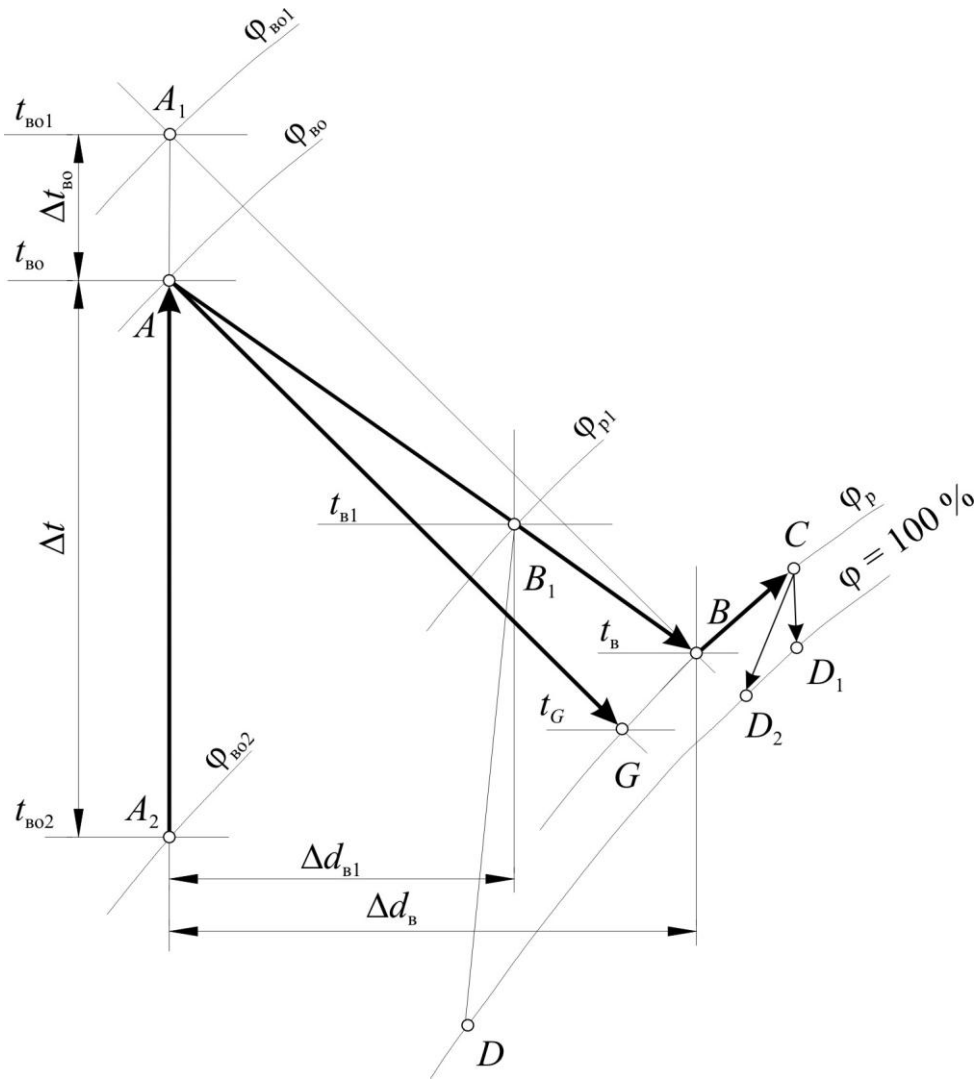


Рисунок 4.6 – Изменение состояния воздуха в слое активно сохнущей травы при $t_{во} < t_к$

что при больших значениях Δt, корректирующий слой может занимать весь объем насыпи биологически активного сырья. В этом случае воздух не успевает охлаждаться до конечной температуры сырья ($t_{в1} > t_к$, $\varphi_{р1} < \varphi_р$), т.е. осушающая способность воздуха используется не полностью ($\Delta d_{в1} < \Delta d_в$), что нецелесообразно с экономической точки зрения. Кроме того, возможно выпадение конденсата в поверхностном слое по направлению B_1D. Если же основной слой все-таки формируется, процесс идет по направлению ABC и далее в поверхностном слое по CD_1 или CD_2, аналогично процессам обработки воздуха в кондиционере.

С учетом описанных особенностей изменения теплофизических параметров вентиляционного воздуха была разработана [37], а позже более полно раскрыта [139], теплофизическая модель тепломассопереноса в процессе сушки растительного сырья (рисунок 4.7).

Представленный графо-аналитический метод оценки интенсивности влагообмена на основе I–d-диаграммы влажного воздуха позволяет определить конечную влажность материала в конкретных условиях сушки, а также выявить возможные зоны конденсации влаги в насыпи высушиваемого материала при изменении режимов сушки и параметров атмосферного воздуха.

Основным недостатком использования I–d-диаграммы для построения процессов тепломассопереноса в слое сохнущего материала являются затруднения при выявлении движущей силы тепломассообмена, и, как следствие, невозможность непосредственного использования зависимости (1.108) для определения величины влагопотока.

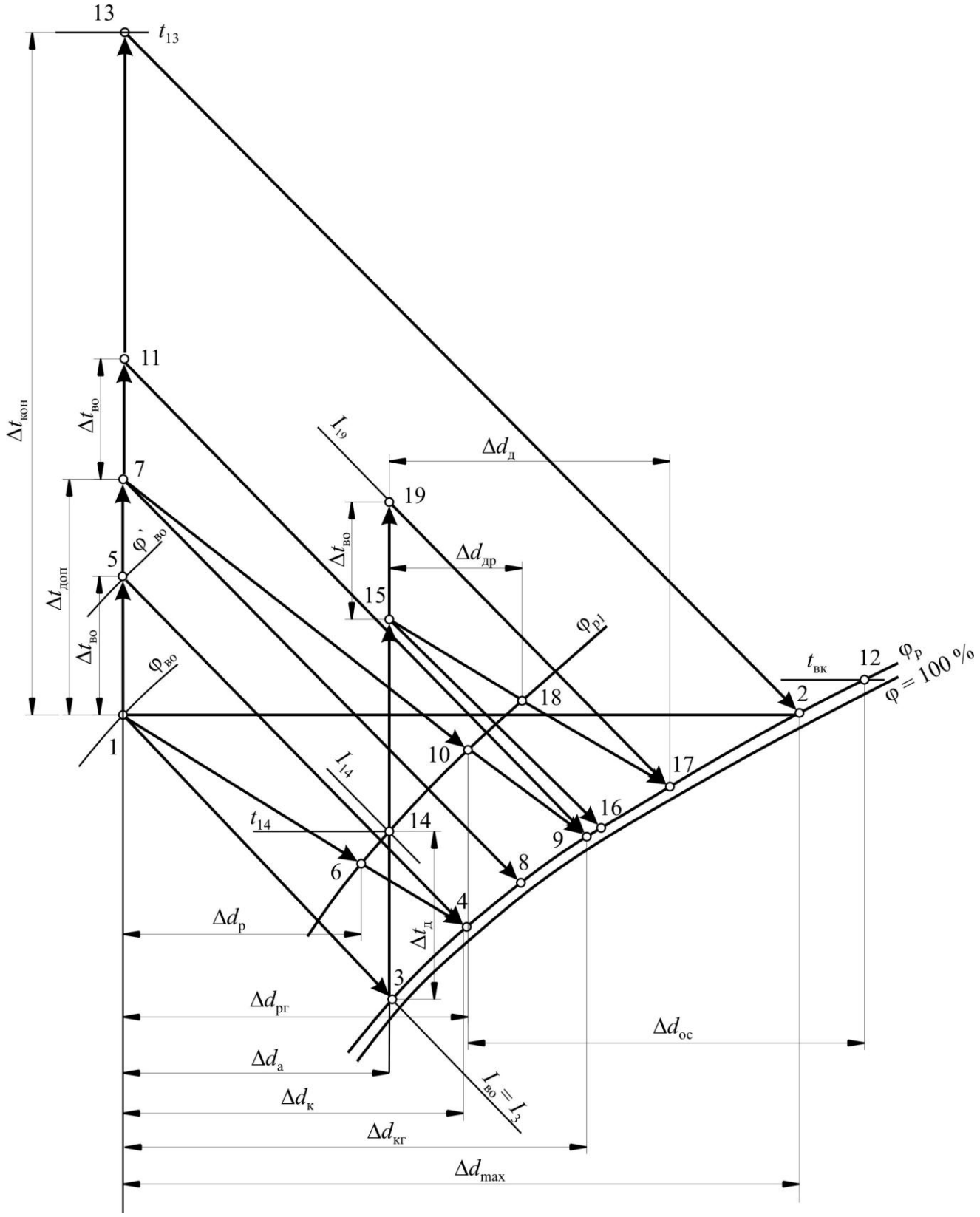


Рисунок 4.7 – К расчету интенсивности и времени сушки биологически активного сырья

4.1.2. Теплофизическая модель тепломассообмена в процессе хранения сочного растительного сырья

Влагообмен в насыпи СРС рассматривается как процесс ассимиляции продуваемым воздухом выделяемой влаги и явной теплоты в процессе дыхания. Эта интерпретация процесса влагообмена в слое сырья позволяет решать вопросы расчета интенсивности тепломассопереноса применяя *I–d*-диаграмму.

Основные закономерности термодинамической теории профессора В.З. Жадана, дают количественные характеристики интенсивности испарения влаги в слое СРС [101, 103, 104]. Количественно процесс влагообмена характеризуется следующим равенством:

$$W = Q / \varepsilon_t, \tag{4.2}$$

где W – количество испаряющейся с поверхности СРС влаги, кг; Q – теплопритоки к вентилируемому воздуху, кДж; ε_t – тепловлажностная характеристика процесса, кДж/кг.

Тепловлажностная характеристика изменения состояния воздуха в насыпи ε_t, определяется выражением:

$$\varepsilon_t = 6385 - 147t, \text{ при } 0 \le t \le 15\ ^\circ\text{C}; \tag{4.3}$$

$$\varepsilon_t = 6385 - 1{,}21t^2 - 335t, \text{ при } -25 \le t \le 0\ ^\circ\text{C}, \tag{4.4}$$

где t – средняя температура воздуха в насыпи,°С.

Изменение относительной влажности воздуха в насыпи характеризуется следующей зависимостью:

$$\varphi_в = \varphi_р = \text{const}, \tag{4.5}$$

показывающее отсутствие насыщения воздуха по высоте охлаждаемой насыпи (1 – $\varphi_в$) = const (рисунок 4.8).

Зависимость (4.2) является универсальной и справедлива для равновесных процессов тепломассообмена в СРС [4, 42, 62, 119, 290, 293]. Отсутствие соблюдения равенства (4.5) в корректирующем слое не снижает ее практической ценности.

В отличие от процесса сушки перенос явной и скрытой теплоты между прордуваемым воздухом и продукцией происходит в одном направлении (рисунок 4.8), что является основной особенностью тепломассопереноса в насыпи СРС. Воздух, поступая в насыпь, проходит через корректирующий слой, в котором он увлажняется до равновесных значений, при этом испаряющаяся влага способствует снижению температуры продукции, что подтверждено экспериментально для капусты [42, 296] и картофеля [103, 316] (рисунок 4.9).

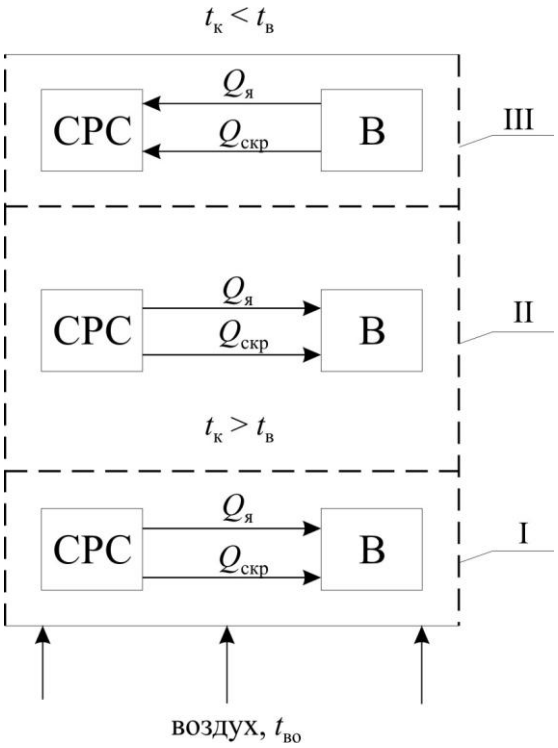


Рисунок 4.8 – Процессы тепломассообмена в слоях хранящейся продукции: I – корректирующий слой; II – основной слой; III – верхний слой

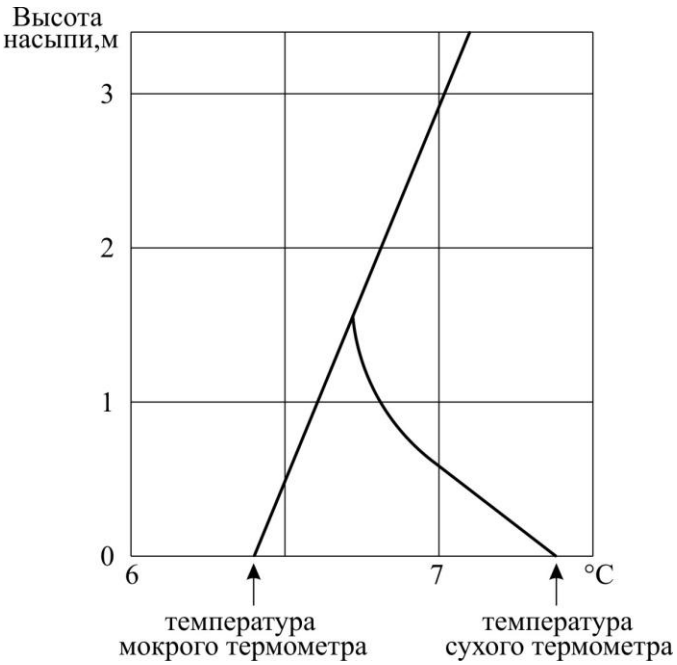


Рисунок 4.9 – Стационарный режим при охлаждении насыпи: $\varphi_{во}$ = 87 %; L = 34 м^3/(м^{2}ч)

Давление насыщения водяного пара на поверхности СРС равно предельному давлению при температуре сырья, т.е. относительная влажность у поверхности $\varphi_{пов} \cong 100$ %. Экспериментально доказано равенство равновесной относительной влажности и относительной влажности воздуха по всей высоте основного слоя насыпи СРС $\varphi_в \cong \varphi_р$ [42, 64, 101, 290].

Постоянные потери влаги сырьем при хранении вызваны неизбежной ассимиляцией влаги продуваемым воздухом. Эта особенность объясняется тем, что температура поверхности сырья $t_{пов}$ больше температуры продуваемого воздуха $t_в$

из за наличия теплоты дыхания, в результате чего упругость пара воздуха у поверхности выше, чем у продуваемого воздуха даже при полном насыщении. Вся явная теплота, вносимая продуваемым воздухом в насыпь хранящейся продукции, в результате переходит в скрытую, тем самым способствуя возрастанию потерь при хранении сырья.

Изменение тепловлажностной характеристики продуваемого воздуха на *I–d*-диаграмме приведено на рисунке 4.10. Процесс *AB* характеризует тепловлажносную обработку воздуха в корректирующем слое, в котором происходит увлажнение от $\varphi_{во}$ до $\varphi_в \cong \varphi_р$ с одновременным нагревом от $t_{во}$ до температуры нижней части основного слоя $t_к^{min}$. Процесс *BC* описывает процесс изменения тепловлажностной характеристики в основном слое, который эквидистантен соответствующему участку линии полного насыщения φ = 100 %. Из насыпи воздух выходит с параметрами точки *C* ($t_к^{max}$, $\varphi_р$). Продуваемый через верхний слой воздух может достичь состояния полного насыщения (процесс *CD*) или привести к выпадению конденсата (процесс CD_1).

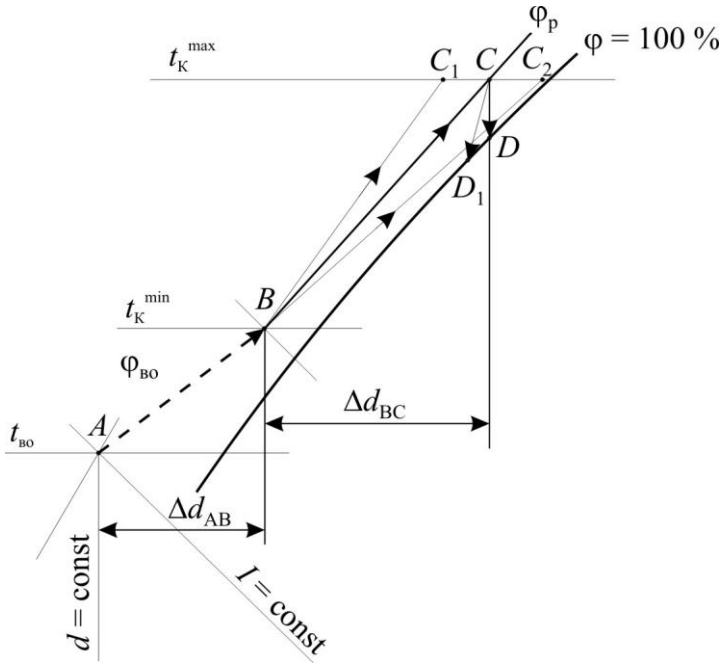


Рисунок 4.10 – Изменение состояния продуваемого воздуха в насыпи сочного растительного сырья

Невозможность отклонения процесса *BC* от соответствующего эквидистантой линии полного насыщения $\varphi_р$ = const, т.е. невозможность процессов BC_1 или

BC_2 на рисунке 4.10, охарактеризовано профессором В.З. Жаданом [103, с. 67…68]: «…возникает физически необъяснимое противоречие между приращением влагосодержания воздуха (его осушающей способностью) и причиной, вызывающей это явление (дефицитом влагосодержания воздуха): большему приращению влагосодержания воздуха будет отвечать малый дефицит влагосодержания и наоборот, чего быть не может».

Потери продукции составляют:

$$W = (\Delta d_{AB} + \Delta d_{BC}) L \rho_{в}. \qquad (4.6)$$

Довести потери до биологически оправданных $\Delta d_{BC} L \rho_{в}$ возможно при предварительной обработке наружного воздуха.

Неясность в определении движущей силы тепломассопереноса ограничивает применение *I–d*-диаграммы для расчета процессов тепломассообмена в слое сочного растительного сырья, что оказывает определяющее влияние на режимы работы, производительность и конструктивные особенности систем обеспечения параметров микроклимата овощекартофелехранилищ.

4.1.3. Графоаналитические исследования *I–d*–θ-диаграммы

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. Для расчета потенциала влажности наружного воздуха в различных диапазонах температур на основе опытных данных профессором В.Н. Богословским получены следующие зависимости [19]:

$$\begin{aligned} \theta_{в} &= -4{,}01 + 0{,}488 t_{в} + 0{,}169 \varphi_{в} && (0\ °C < t_{в} \le 10\ °C); \\ \theta_{в} &= -13{,}6 + 1{,}22 t_{в} + 0{,}204 \varphi_{в} && (10\ °C < t_{в} \le 20°C). \end{aligned} \qquad (4.7)$$

Каждому значению потенциала влажности θ соответствует бесконечное множество сочетаний значений температуры $t_{в}$ и относительной влажности $\varphi_{в}$. В работе [24] представлена *I–d*-диаграмма с нанесенными на нее линиями постоянных потенциалов θ = const (рисунок 4.11). Графические зависимости θ не объяснены с термодинамической позиции и не имеют математической обработки.

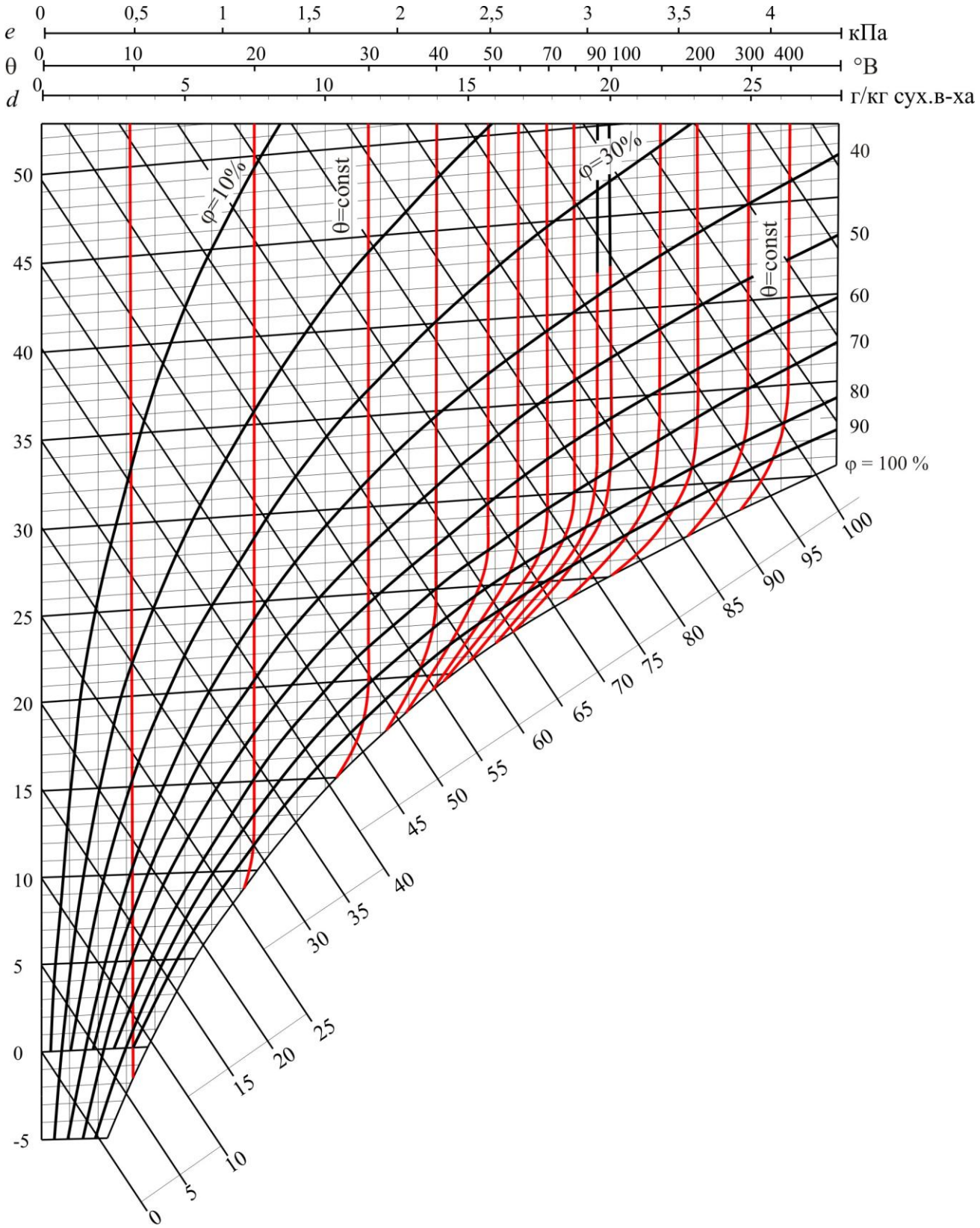


Рисунок 4.11 – *I*–*d*–θ-диаграмма влажного воздуха [24]

Использование I–d–θ-диаграммы для инженерного расчета процесса сушки и хранения растительного сырья позволит графически определить значения потенциала влажности θ воздуха в слое и применить зависимость (1.108) для определения интенсивности влагопотока.

Как видно из рисунка 4.11, линии θ = const на I–d-диаграмме представляют собой группу параллельных кривых. При $\varphi_в$ < 80 % линии потенциала влажности являются прямыми во всем диапазоне температур и параллельны линиям d = const. В области высоких значений относительной влажности воздуха ($\varphi_в$ > 80 %) линии θ = const имеют значительные отклонения в сторону уменьшения значений влагосодержания влажного воздуха.

Для термодинамического обоснования характера кривых θ = const нами были проведены следующие аналитические исследования.

Воспользовавшись уравнением Клапейрона, относительную влажность воздуха можно выразить отношением парциальных давлений водяного пара:

$$\varphi = \frac{p_п}{p_{пн}} \cdot 100\%. \qquad (4.8)$$

Давление насыщенного водяного пара $p_{пн}$ зависит только от температуры воздуха. Его значения определены экспериментальным путем и приведены в [199].

Используя соотношение для парциального давления пара:

$$p_п = \frac{p_б d}{623 + d}, \qquad (4.9)$$

можно выразить относительную влажность воздуха через его влагосодержание:

$$\varphi = \frac{p_б d}{(623 + d)\, p_{пн}} 100\%. \qquad (4.10)$$

Используя полученное выражение (4.10), нами построена зависимость между температурой t и относительной влажностью воздуха φ при некоторых значениях влагосодержания d (рисунок 4.12). Характер полученных кривых говорит о том, что с понижением температуры при d = const величина относительной влажности воздуха экспоненциально возрастает, т.е. оказывает большее влияние на

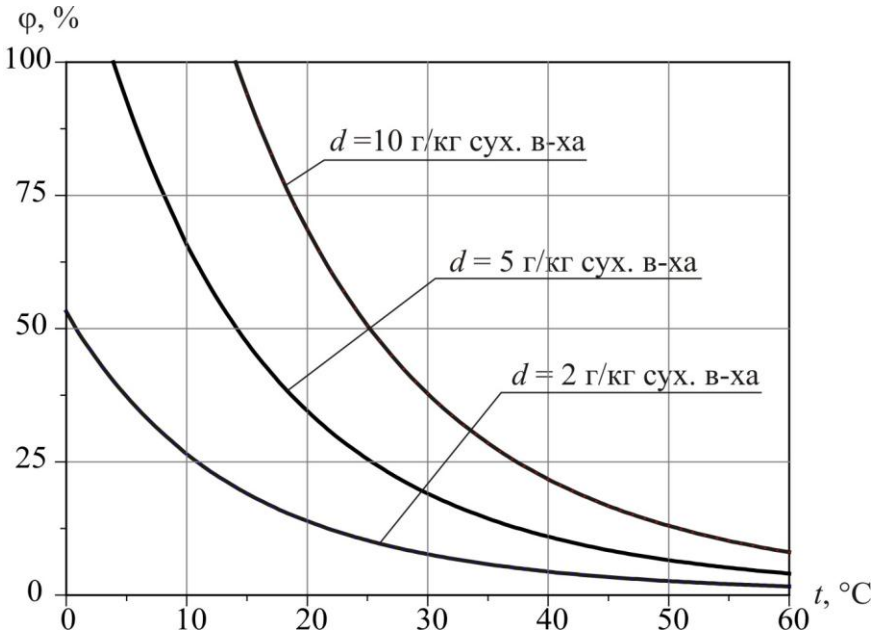


Рисунок 4.12 – Зависимость между температурой и относительной влажностью воздуха

значение потенциала влажности, чем изменение температуры, что качественно подтверждается математическим видом зависимости (4.7). Именно следствием этого, по нашему мнению, является возникновение кривизны линий θ = const в сторону уменьшения влагосодержания в области высоких значений относительной влажности (φ > 80 %) (рисунок 4.12), где взаимосвязь t и φ особенно выражена. При t > 30 °С зависимость относительной влажности от влагосодержания можно представить линейной, вследствие чего значения θ качественно совпадают с прямой d = const. Это явление подтверждается отсутствием процесса массопереноса при постоянном влагосодержании и косвенно объясняет геометрический вид линий θ = const.

Графически определенное отношение $\Delta t/\Delta d$ (рисунок 4.11) при постоянном значении потенциала θ представлено в таблице 4.1 и составляет в интервале значений относительной влажности 80…90 % в среднем $\Delta t/\Delta d$ = 2,63, в интервале 90…100 % равно $\Delta t/\Delta d$ = 1,89, что соответствует углу наклона линий θ = const, соответственно, 69° и 62°. Средний угол отклонения линий θ = const от прямых d = const в диапазоне 80 < φ < 100 % составляет 65°, средняя величина $\Delta t/\Delta d$ = 2,20.

Таблица 4.1 – Отношение $\Delta t/\Delta d$ при постоянном значении потенциала влажности

Потенциал влажности	$\Delta t/\Delta d$ при 80 < φ < 90 %	$\Delta t/\Delta d$ при 90 < φ <100 %	$\Delta t/\Delta d$ при 80 < φ < 100%
400	3,17	2,13	2,48
300	3,00	1,88	2,40
200	2,97	1,64	2,04
150	2,88	1,53	1,88
100	2,50	1,71	2,00
90	2,33	1,80	2,00
80	2,31	1,76	1,97
70	2,23	1,95	2,06
60	2,42	2,20	2,50
50	2,50	2,27	2,63

Путем построения зависимости между потенциалом влажности θ и влагосодержанием воздуха *d* при относительной влажности воздуха менее 80 % (рисунок 4.13) и аппроксимации полученной кривой получены следующие эмпирические зависимости:

$$\theta = 1{,}244e^{0{,}219d}, \qquad (20 < d \le 30);$$
$$\theta = 6{,}78e^{0{,}131d}, \qquad (0 < d \le 20). \qquad (4.11)$$

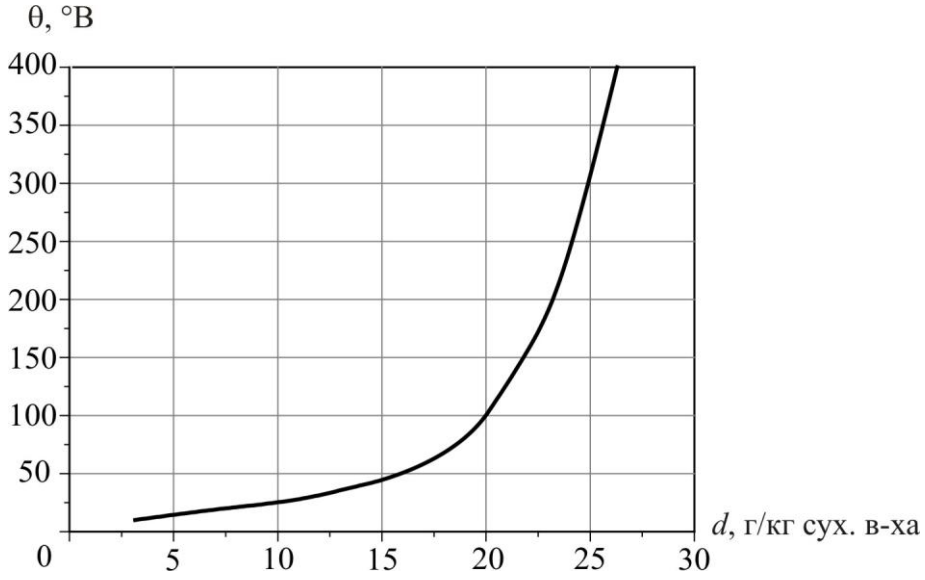


Рисунок 4.13 – Зависимость потенциала влажности θ от влагосодержания влажного воздуха при φ < 80 %

С целью получения аналогичных зависимостей для определения значений потенциала влажности при относительной влажности воздуха более 80 % построены кривые lgθ = *f(d)* при *t* = const (рисунок 4.14). Как видно из рисунка, зависимость $\lg\theta_t = f(d)$ представляет собой группу параллельных прямых, каждая из

которых соответствует определенному значению температуры воздуха и может быть описана линейным уравнением вида:

$$\lg \theta = 0{,}12\,d - A_t\,, \qquad (4.12)$$

где A_t – температурный коэффициент.

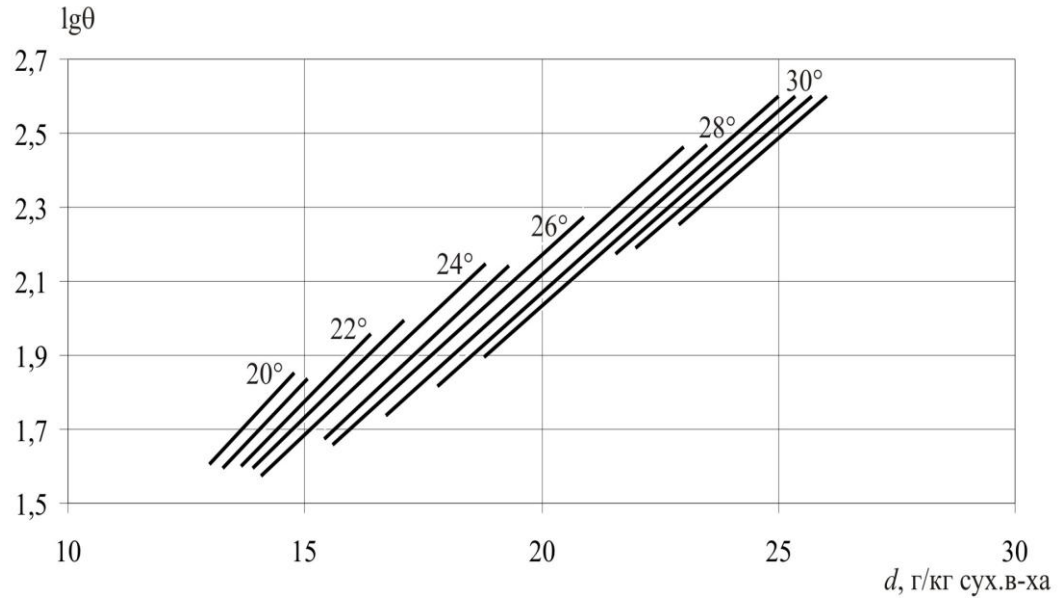


Рисунок 4.14 – Зависимость потенциала влажности θ от влагосодержания влажного воздуха при φ > 80 %

С целью получения математического выражения для определения значений параметра A_t построен график изменения величины данного коэффициента в зависимости от температуры воздуха t (рисунок 4.15).

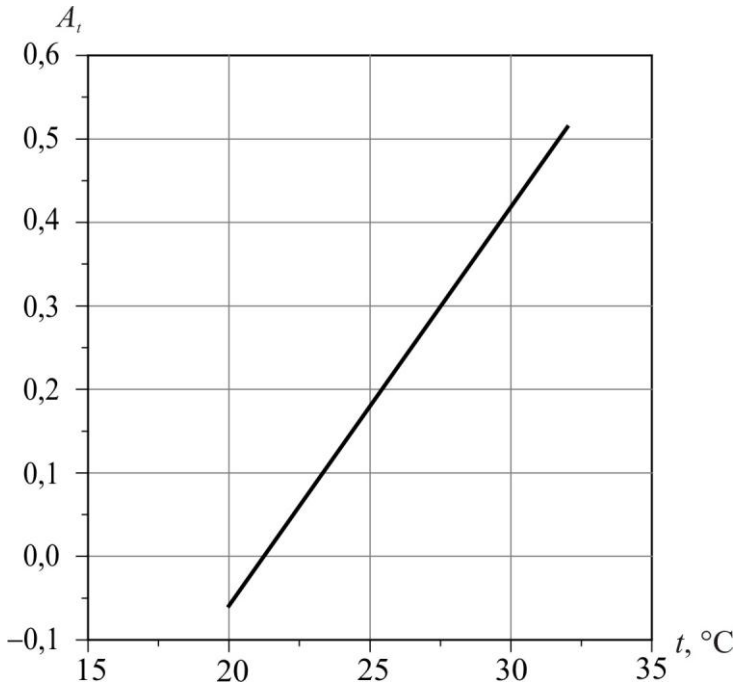


Рисунок 4.15 – Зависимость коэффициента A_t от температуры воздуха

Аппроксимация построенной кривой дала следующий результат:

$$A_t = 0{,}049\,t - 1{,}056\ . \qquad (4.13)$$

При инженерных расчетах погрешность величины θ не превышает 10 %:

$$\lg\theta = 0{,}12d - 0{,}049t + 1{,}056. \qquad (4.14)$$

Преобразовав зависимости (4.12) к подобному виду получим:

$$\lg\theta = 0{,}096d + 0{,}082; \qquad (20 < d \le 30)$$
$$\lg\theta = 0{,}057d + 0{,}829. \qquad (0 < d \le 20) \qquad (4.15)$$

Использование предложенных зависимостей для определения величины θ позволяет значительно упростить инженерные расчеты процесса сушки растительного сырья и построить изотермы сорбции-десорбции биологически активного материала в координатах $w_{\text{тр}} - \theta$.

Для преобразования оси относительной влажности воздуха в ось потенциала влажности необходимо выявить зависимость между относительной влажностью воздуха φ и его влагосодержанием *d*.

Зависимость (4.10) представляет собой дробно-линейную функцию. Однако в диапазоне значений влагосодержания от 0 до 30 график функции представляет собой семейство прямых, каждая из которых соответствует определенному значению температуры (рисунок 4.16). Каждая из прямых пересекает систему координат в точке (0;0) и может быть описана уравнением типа $y = kx$, где угловой коэффициент *k* равен тангенсу угла наклона прямой β. Например:

при t = 20 °C $\qquad \varphi = 6{,}713d$;

при t = 30 °C $\qquad \varphi = 3{,}698d$. $\qquad (4.16)$

Угол поворота прямых $\varphi_t = f(d)$ зависит только от температуры воздуха. Построив зависимость $\beta = f(t)$ и $\beta = f(p_{\text{пн}})$, для определения угла поворота β, град, были получены следующие зависимости:

$$\beta = 87{,}5 - 0{,}0125t^2 - 0{,}051t\ ; \qquad (4.17)$$

$$\beta = 89{,}7 - 0{,}449\ p_{\text{пн}}\ . \qquad (4.18)$$

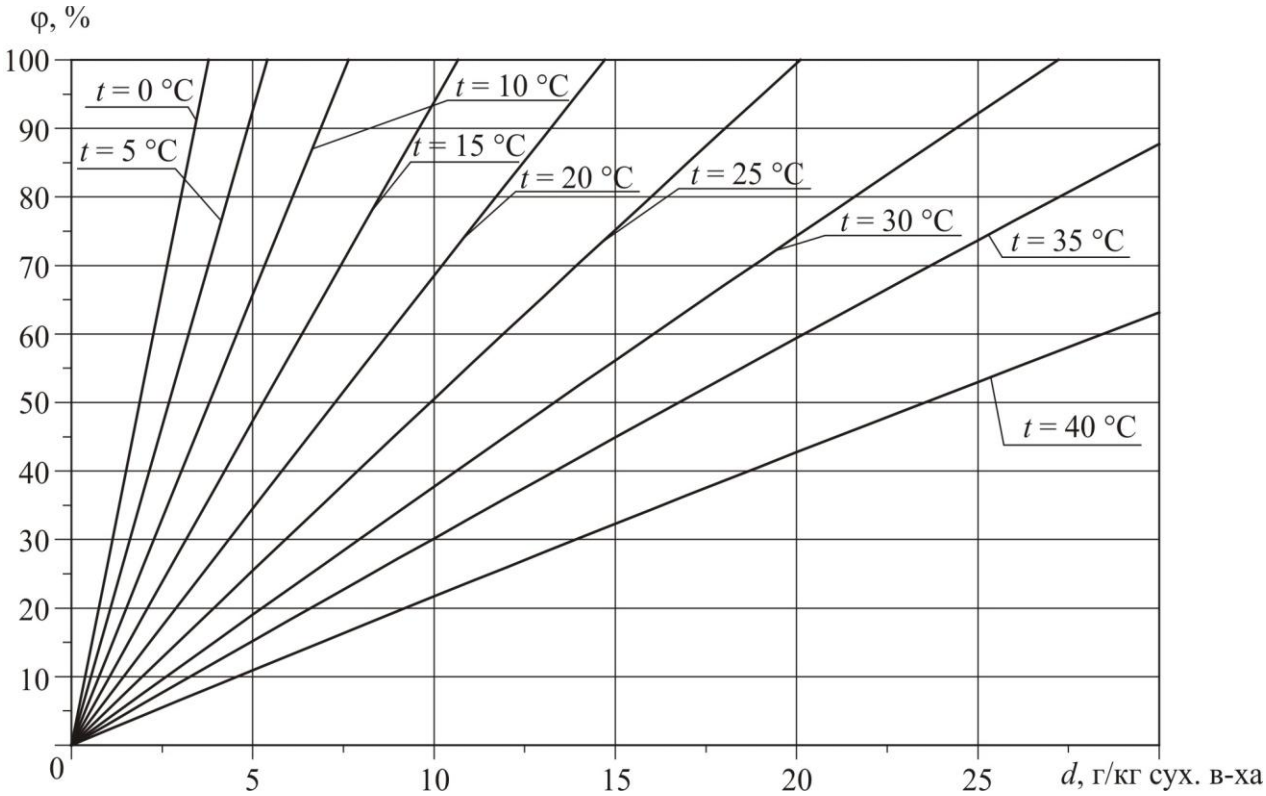


Рисунок 4.16 – Зависимость относительной влажности воздуха от влагосодержания

Угловой коэффициент *k* при различных значениях температуры может быть непосредственно определен по формуле:

$$k = tg\beta = 24{,}39e^{-0{,}062t}. \qquad (4.19)$$

Экспоненциальный вид зависимости (4.19) подтверждает геометрический вид кривых φ = *f(t)*, представленных на рисунке 4.12.

Таким образом, при любом постоянном значении температуры воздуха, зависимость φ = *f(d)* может быть однозначно описана линейным уравнением, что в свою очередь позволяет с использованием ранее полученных зависимостей построить изотермы сорбции-десорбции в координатах $w_{тр}$– θ (рисунок 4.17) [40, 41]. Как видно из представленного графика, изотермы имеют S-образную форму, что характерно и для изотерм, построенных в координатах $w_{тр}$ – $\varphi_{в}$. Кроме того, представленные изотермы аналогичны представленным в работе [139], но построенным по экспериментальным данным.

Изображение изотерм сорбции-десорбции растительного сырья в осях $w_{тр}$ – θ наглядно показывает гигроскопические свойства материала в зависимости от потенциала влажности воздуха.

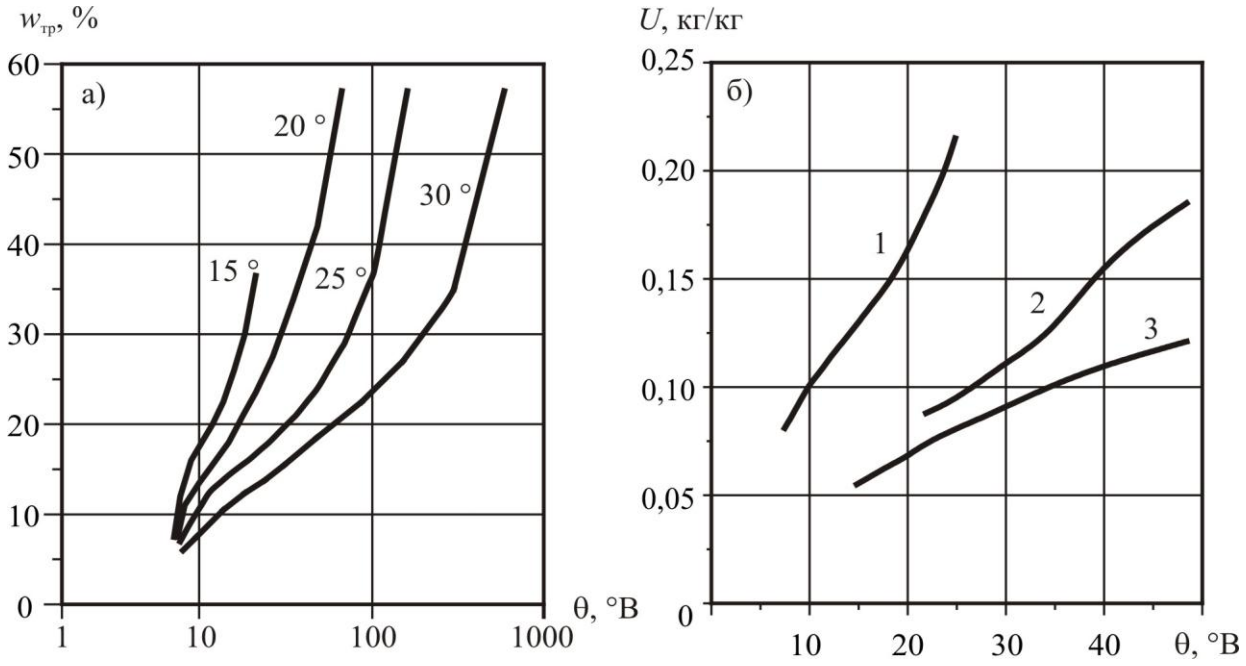


Рисунок 4.17 – Изотермы: а – сорбции влаги для тимофеевки; б – сорбции влаги для: 1 – злаки; 2 – соя; 3 – семена подсолнечника

Использование предложенных изотерм позволяет оценить влагопоглощающую способность воздуха через потенциал θ, определить зоны увлажнения и сушки растительного сырья в зависимости от климатического районирования страны и суточного хода изменения температуры и относительной влажности наружного воздуха (при продувке неподогретым воздухом), в том числе в период дождей.

Для описания процессов тепломасообмена в процессе хранения сочного растительного нами были проведены аналитические исследования *I*–*d*–θ-диаграммы в области низких температур.

Рассмотрим зависимость между потенциалом влажности и упругостью водяного пара в воздухе при различных температурах, приведенную в [24] и представленную на рисунке 4.18.

Для каждой температуры воздуха существует такое значение упругости водяного пара, по достижении которого его значение не оказывает влияние на значение потенциала влажности. Величина этого предельного давления представляет собой давление насыщения водяного пара в воздухе, т.е. состояние при котором относительная влажность φ = 100 %. При достижении давления насыщения, ха-

рактеристика потенциала влажности описывается линией параллельной оси абсцисс (θ).

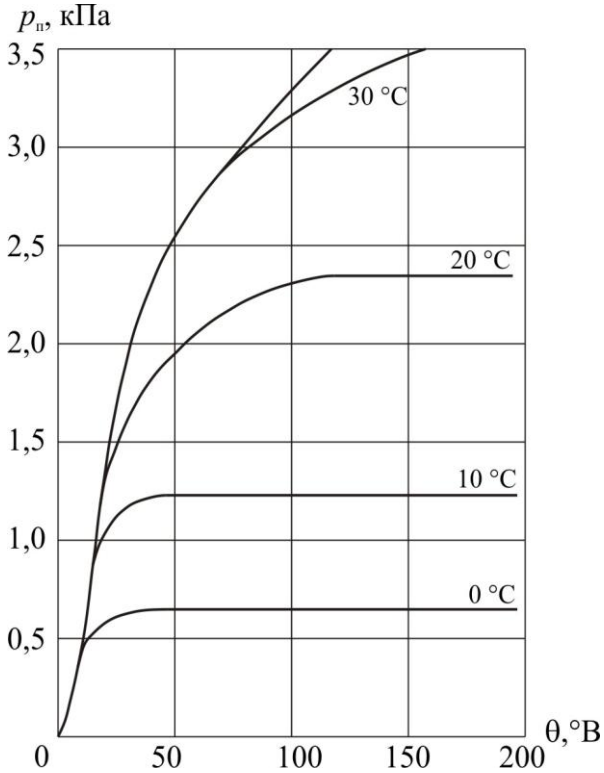


Рисунок 4.18 – Зависимость между потенциалом влажности воздуха и упругостью водяного пара в воздухе [24]

Давление насыщения водяного пара зависит только от температуры воздуха и определено экспериментально [49]. Каждой температуре соответствует определенное давление насыщения. Связь между давлением насыщенного водяного пара $p_{пн}$, кПа, над плоской поверхностью воды и температурой определяется по формуле:

$$p_{пн} = 0{,}6112 \cdot \exp\left[\frac{\alpha_в \cdot t}{\beta_в + t}\right], \qquad (4.20)$$

где $\alpha_в$, $\beta_в$ – постоянные для воды, $\alpha_в$ = 17,504, $\beta_в$ = 241,2 °С; t – температура плоской поверхности воды, °С.

Используя зависимость (4.20), определим давление насыщения для температур от 0 °С до 23 °С с шагом в 1 градус и построим кривые $p_п = f(\theta)$ (рисунок 4.19).

Анализ показывает, что кривую, характеризующую зависимость давления пара в воздухе $p_п$ от потенциала влажности θ при определенной температуре,

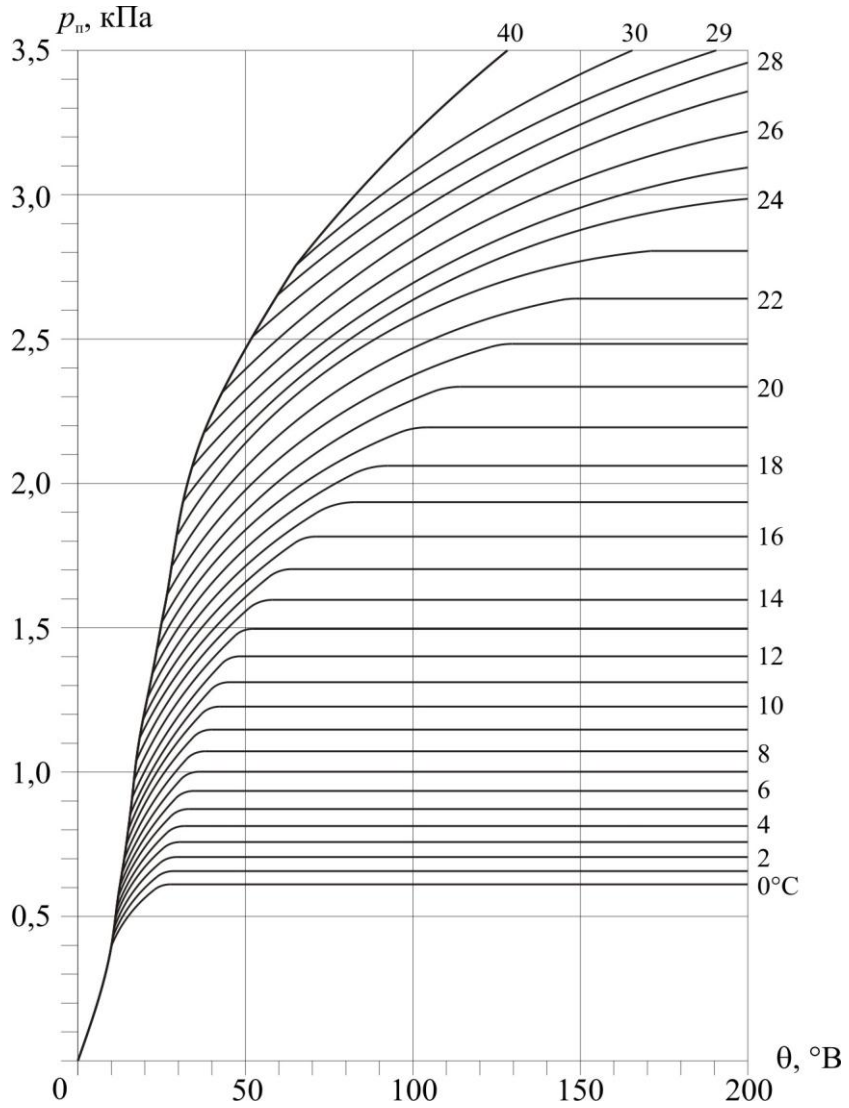


Рисунок 4.19 – Зависимость между потенциалом влажности воздуха и упругостью водяного пара в воздухе, для ряда температур с шагом в 1 °С

можно условно разбить на три характерных участка (рисунок 4.20):

− первый участок (кривая *abe*) − в этом диапазоне значения $p_п$ зависят от θ и не зависят от температуры;

− второй участок (кривая *bc*) − значения $p_п$ имеют определенную зависимость от потенциала влажности и температуры;

− третий участок (прямая *cd*) − на характеристику потенциала влажности θ не оказывают влияние значения упругости водяного пара $p_п$, данный участок характеризуется прямой параллельной оси абсцисс; значения $p_п$ равны давлению насыщения пара в воздухе при конкретной рассматриваемой температуре воздуха.

Для всех кривых прослеживается зависимость нахождения точки *b* на луче *ac*. Значения $p_п$ точки *b* при любой температуре находятся в диапазоне относи-

тельной влажности $\varphi_в \approx 65$ %. На зависимость $p_п$ от θ не оказывает влияние температура при $\varphi_в \geq 65$ %, что также видно на рисунке 4.11.

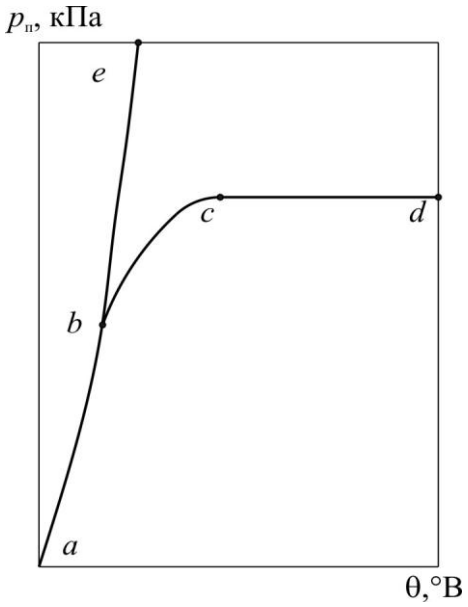


Рисунок 4.20 – Характерные участки кривой $p_п = f(\theta, t)$

В результате аппроксимации кривых в области *bc* получим:

$$p_п = a_{t1} \cdot \left(1 - e^{-b_{t1} \cdot \theta}\right) \quad (\text{при } 0 \leq t \leq 5 \text{ и } 65 < \varphi \leq 100); \tag{4.21}$$

$$p_п = a_{t2} + b_{t2} \cdot r_t^{\theta} \quad (\text{при } t > 5 \text{ и } 65 < \varphi \leq 100), \tag{4.22}$$

где a_{t1}, b_{t1}, a_{t2}, b_{t2}, r_t – температурные коэффициенты.

Для получения математического выражения, характеризующего значения параметров a_{t1}, b_{t1}, a_{t2}, b_{t2}, r_t построены графики изменения величины данных коэффициентов (рисунки 4.21…4.25). Аппроксимация построенных кривых дала следующий результат:

$$a_{t1} = 0{,}66 + 0{,}067 \cdot t; \tag{4.23}$$

$$b_{t1} = 0{,}088 - 0{,}0033 \cdot t; \tag{4.24}$$

$$a_{t2} = 0{,}46 + 0{,}11 \cdot t; \tag{4.25}$$

$$b_{t2} = -0{,}81 - 0{,}04 \cdot t; \tag{4.26}$$

$$r_t = 0{,}91 \cdot t^{0{,}027}. \tag{4.27}$$

Подставим полученные зависимости в формулы (4.21) и (4.22):

$$p_п = 0{,}66 + 0{,}067 \cdot t \cdot \left(1 - e^{(-0{,}088 + 0{,}0033 \cdot t)\theta}\right) \quad (\text{при } 0 \leq t \leq 5 \text{ и } 65 < \varphi \leq 100); \tag{4.28}$$

$$p_{\text{п}} = 0{,}46 + 0{,}11 \cdot t + (-0{,}81 - 0{,}04 \cdot t) \cdot (0{,}91 \cdot t^{0{,}027})^{\theta}$$
$$(\text{при } t > 5 \text{ и } 65 < \varphi \le 100). \qquad (4.29)$$

Полученные уравнения (4.28, 4.29) математически описывают изменение упругости водяного пара в воздухе от изменения температуры и потенциала влажности воздуха.

В результате проведения аппроксимации кривой, представленной на рисунке 4.19 в области *ae*, получены уравнением вида:

$$p_{\text{п}} = 0{,}023 + 0{,}017 \cdot \theta^{1{,}34} \quad (\text{при } p_{\text{п}} \le 0{,}4\,\text{кПа и } \varphi < 65\,\%); \qquad (4.30)$$

$$p_{\text{п}} = 4{,}15 \cdot \ln(0{,}46 \cdot \ln(\theta)) \quad (\text{при } p_{\text{п}} > 0{,}4\,\text{кПа и } \varphi < 65\,\%); \qquad (4.31)$$

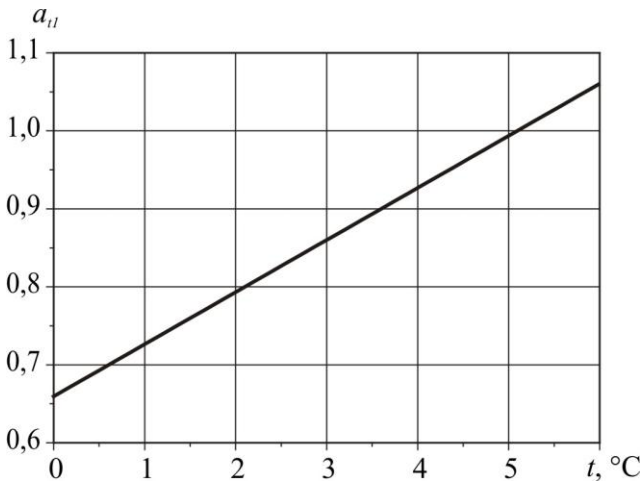


Рисунок 4.21 – Зависимость коэффициента a_{t1} от температуры воздуха

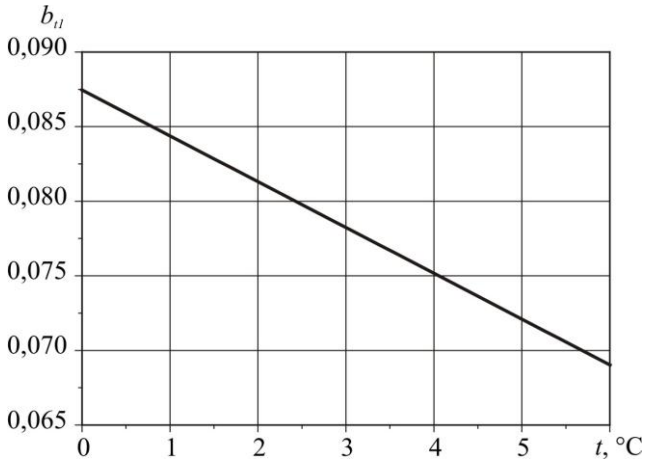


Рисунок 4.22 – Зависимость коэффициента b_{t1} от температуры воздуха

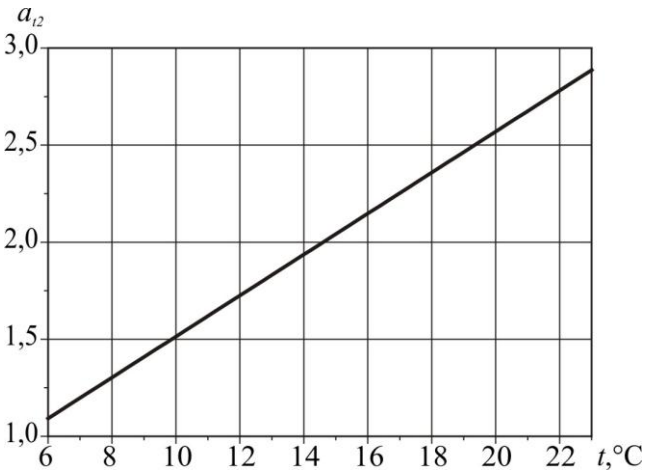


Рисунок 4.23 – Зависимость коэффициента a_{t2} от температуры воздуха

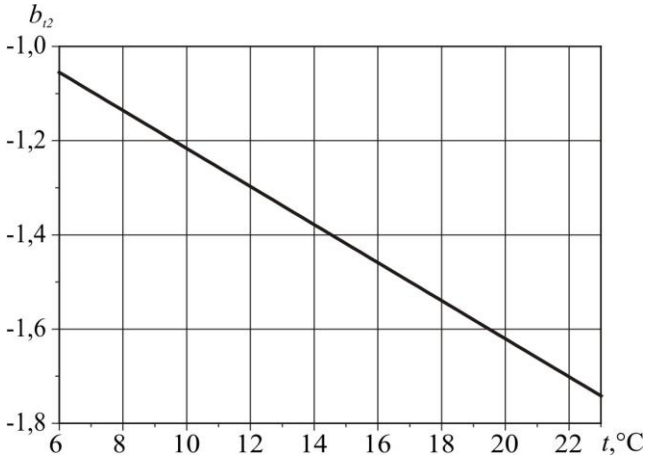


Рисунок 4.24 – Зависимость коэффициента b_{t2} от температуры воздуха

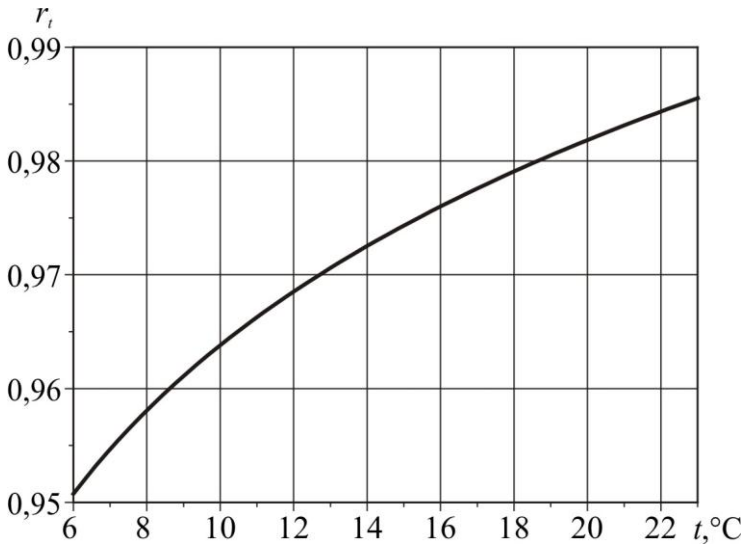


Рисунок 4.25 – Зависимость коэффициента r_t от температуры воздуха

Используя полученные зависимости (4.28…4.31) нанесем линии постоянных значений потенциалов θ = const на *I*–*d*-диаграмму (рисунке 4.26) [156].

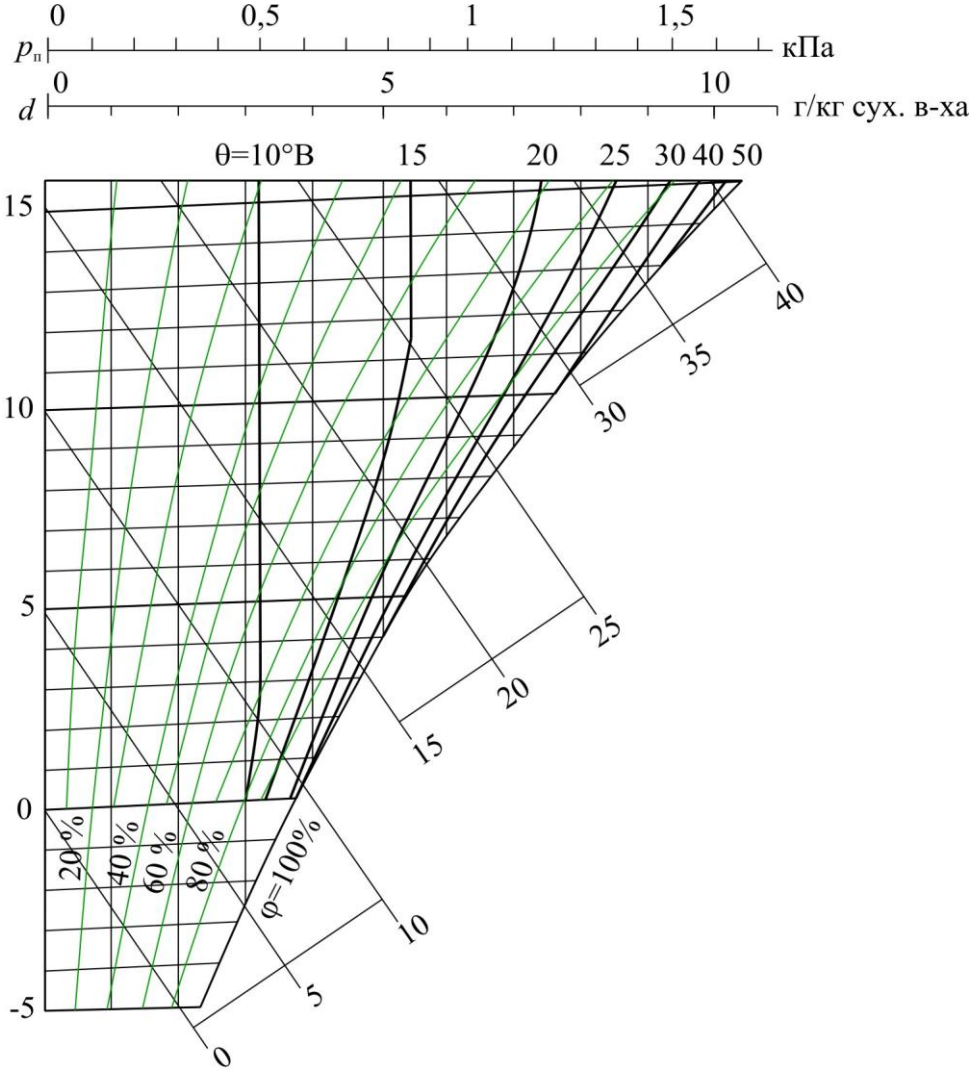


Рисунок 4.26 – Уточненная *I*–*d*–θ-диаграмма в области низких положительных температур

Полученные аналитические зависимости позволяют использовать предложенную I–d–θ-диаграммы для инженерных расчетов сушки и хранения биологически активного сырья.

4.1.4. Построение процессов тепломассообмена в процессе сушки на I–d–θ-диаграмме

На базе общей теплофизической модели изменения состояния воздуха при продувке его через слой растительного сырья (рисунок 4.3) построим основные процессы тепломассобмена между воздухом (сушильный агент) и травой/зерном (объект сушки) (рисунок 4.27).

Параметры приточного воздуха в точке 1 – $t_{во}$, $\varphi_{во}$, $d_{во}$, $I_{во}$, $\theta_{во}$. Гипотетически влагопоглощающий потенциал воздуха достигает максимального значения при протекании процесса сушки по t = const (луч 1–2), который равен $\Delta d_{max} = d_2 - d_1$. В действительности, наличие на поверхности материала свободной влаги обусловливает адиабатность этого процесса при $w_{тр} > w_г$ (луч 1–3). Величина равновесной относительной влажности воздуха в точке 3 $\varphi_3 = \varphi_р$ близка к φ = 100 %, что определяет время протекания процесса. Сорбционная способность воздуха составляет $\Delta d_а = d_3 - d_1$, $\Delta\theta_а = \theta_3 - \theta_1 > 0$. Теплота самосогревания повышает ассимилирующую способность воздуха до $d_к = d_4 - d_1$, отклоняя луч процесса (1–4) от изоэнтальпы $I_3 = I_{во}$ = const на величину, равноценную предварительному подогреву приточного воздуха на $\Delta t_{во}$ (луч 1–5) и увеличивает разность потенциалов влажности до $\Delta\theta_к = \theta_4 - \theta_1 > 0$. Параметры воздуха в точке 5 $t'_{во} > t_{во}$, $\varphi'_{во} > \varphi_{во}$, $I'_{во} > I_{во}$, $d'_{во} = d_{во}$, $\theta'_{во} = \theta_{во}$.

С удалением несвязанной влаги с поверхности материала, т.е. при снижении влажности сырья до $w_{тр} < w_г$, имеет место перемещение зоны испарения вглубь слоя, наступает период падающей скорости сушки. При этом величина равновесной относительной влажности воздуха $\varphi_{р1}$, определяемая по кривым десорбции, значительно отличается от 100 %. Осушающий потенциал воздуха уменьшается до значений $\Delta d_р = d_6 - d_1$ (луч 1–6). Разность потенциалов влажности воздуха $\Delta\theta_р = \theta_6 - \theta_1$.

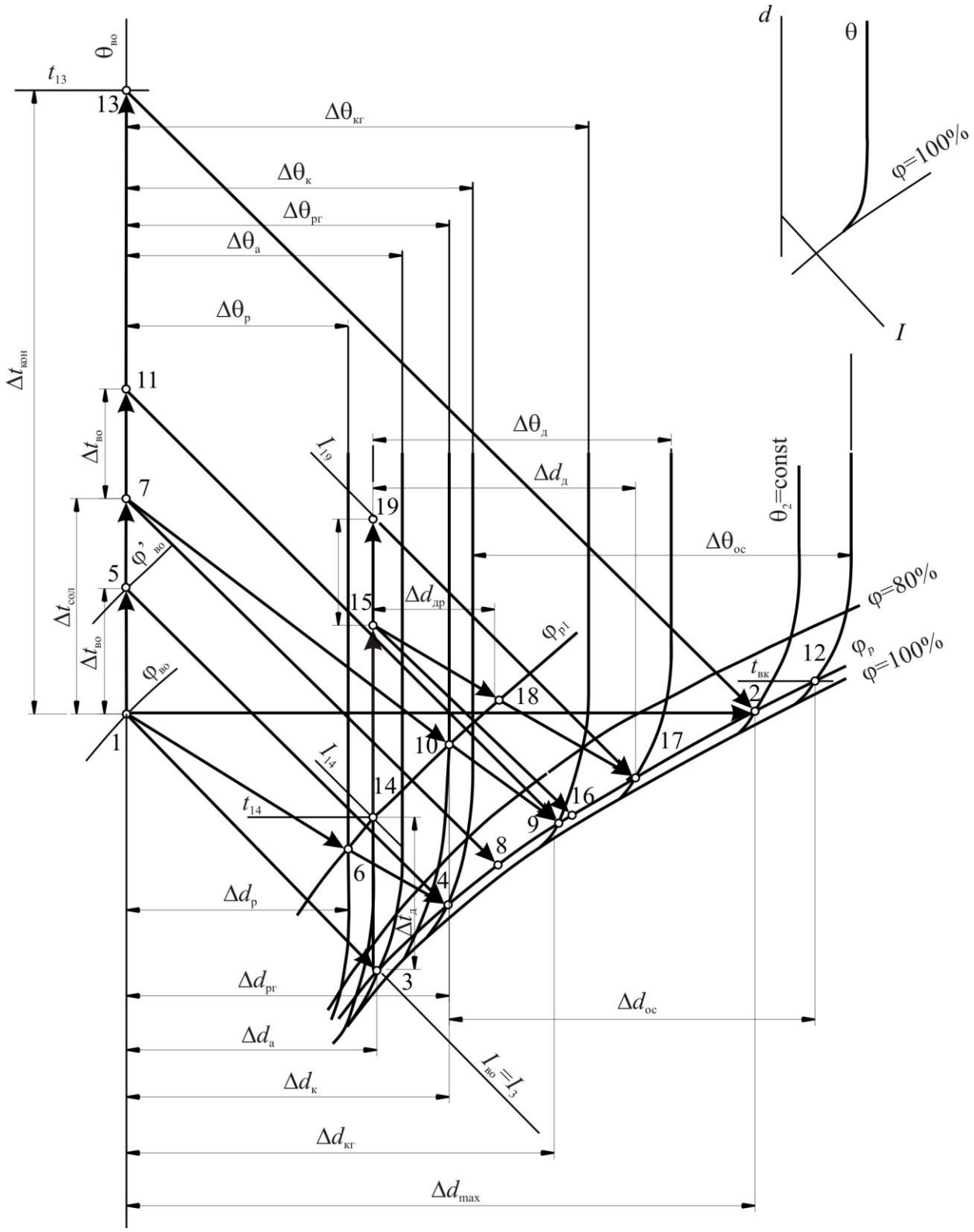


Рисунок 4.27 – К расчету интенсивности и времени сушки травы с использованием *I*–*d*–θ-диаграммы

Ассимилирующую способность воздуха можно увеличить предварительно нагрев его за счет теплоты сгорания топлива и/или солнечной энергии. Суммарное повышение температуры (луч 1–11) за счет искусственного подогрева (Δt) и биологических тепловыделений $Q_б$ ($\Delta t_{во}$) дает увеличение влагопоглощающей способности воздуха до величины $\Delta d_{кг} = d_9 - d_1$ при влажности сырья выше гигроскопической (процесс 7–9), и до $\Delta d_{рг} = d_{10} - d_1$ при $w_{тр} < w_г$ (процесс 7–10). Интенсивность влагопотока определяется разностью потенциалов $\Delta\theta_{кг} = \theta_9 - \theta_1$ (при $w_{тр} > w_г$) и $\Delta\theta_{рг} = \theta_{10} - \theta_1$ (при $w_{тр} < w_г$).

При продувке основного слоя растительной массы относительная влажность воздуха остается постоянной $\varphi_4 = \varphi_р \approx 100\%$, однако процесс влагопоглощения не прекращается (4–12) благодаря внутренним теплопоступлениям ($Q_{ак} + Q_б$), в результате чего сорбционная способность воздуха составляет $\Delta d_{ос} = d_{12} - d_4$. Скорость процесса влагообмена определяется величиной $\Delta\theta_{ос} = \theta_{12} - \theta_4$.

Если температура продувочного воздуха на входе в поверхностный слой ($t_{вII}$) превышает температуру самого слоя ($t_{кIII} \sim t_н$) образуется фронт выпадения конденсата. При выборе режимов сушки биологически активного сырья необходимо учитывать, что фронт выпадения конденсата может смещаться и в основной слой сохнущего материала. Данное явление может наблюдаться при периодической работе САВ, когда температура воздуха на выходе из корректирующего слоя при возобновлении продувки оказывается выше температуры самого основного слоя ($t_{вII} \sim t_н$). Предварительный перегрев воздуха больший, чем $\Delta t_{кон} = t_{13} - t_1$ также вызывает выпадение конденсата.

Для Центральной полосы России и Поволжья, где в период послеуборочной обработки растительного сырья (июнь-август) часто наблюдаются дожди, весьма актуальным является вопрос обеспечения качественной корректировки режимов работы САВ.

Изменение параметров наружного воздуха в период кратковременных дождей можно в первом приближении считать адиабатным (процесс 1–3) до линии $\varphi \sim 100$ %. Рассмотрим возможность продувки штабеля растительного сырья во

время дождя воздухом с начальными параметрами $t_{во}$ и $\varphi_{во}$ (точка 1) без увлажнения продукции. Очевидно, что продувка подсушенного материала ($w_{тр} < w_г$) воздухом, подогретым до значений параметров точки 14 (луч 3–14) $\Delta t_д = t_{14} - t_3$ не даст положительного результата. Отрицательное значение разности потенциалов $\Delta\theta = \theta_{14} - \theta_3$ подтверждает факт увлажнения продукции. Следовательно, только дополнительный нагрев воздуха выше значения t_{14} позволяет воздуху абсорбировать влагу из слоя сырья. При этом влагопоглощающая способность воздуха при перегреве его до температуры t_{15} составляет $\Delta d_{др} = d_{18} - d_{15}$ при движущей силе массопереноса $\Delta\theta_{др} = \theta_{18} - \theta_{15}$ [165].

Количество теплота необходимое для нагрева воздуха до требуемых в период дождей параметров [35, 38]:

$$Q_д = (I_{19} - I_3) L_в \rho_в . \qquad (4.32)$$

Полезно используемая на сушку часть теплоты составляет:

$$Q_{дп} = (I_{19} - I_{14}) L_в \rho_в . \qquad (4.33)$$

Теоретически необходимый минимальный расход воздуха для поглощения влаги с поверхности травы в периоде постоянной скорости сушки ($w_{тр} \geq w_г$) составляет:

$$G_{ВСГ} = \frac{10^3 G_{тр}(w_{тр} - w_г)}{(100 - w_к)\Delta d_к} = \frac{10^3 G_с (w_{тр} - w_г)}{(100 - w_{тр})\Delta d_к} . \qquad (4.34)$$

В периоде падающей скорости сушки ($w_{тр} < w_г$):

$$G_{ВГ} = \frac{10^3 G_{тр}(w_{тр} - w_к)}{(100 - w_к)\Delta d_р} = \frac{10^3 G_с (w_{тр} - w_к)}{(100 - w_{тр})\Delta d_р} . \qquad (4.35)$$

Общая продолжительность сушки травы до кондиционной влажности τ при непрерывной работе САВ производительностью $L_в$ складывается из времени сушки в периоде постоянной скорости в пределах от $w_{тр}$ до $w_г$ ($\tau_1 = G_{ВСГ}/\rho_в L_в$) и продолжительности периода досушки от $w_г$ до кондиционной влажности $w_к$ ($\tau_2 = G_{ВГ}/\rho_в L_в$). Время сушки предварительно провяленной в поле травы ($w_{тр} \approx w_г$) может определяться только продолжительностью второго периода $\tau = \tau_2$.

4.1.5. Построение процессов тепломассообмена на *I*–*d*–θ-диаграмме при различных способах обработки приточного воздуха

Интенсивность тепломассообмена оказывает основное влияние на выбор способа обработки наружного воздуха [153, 154, 237, 238]. Анализ соотношений объемов наружного и рециркуляционного воздуха в течение периода хранения и их влияние на потери продукции в зависимости от способов предварительной обработки воздуха проведем с использованием *I*–*d*–θ-диаграммы. В зависимости от параметров наружного воздуха получены различные варианты обработки воздуха с учетом интенсивности влагопотока в системе «продуваемый воздух – сочное растительное сырье», определяемой разностью потенциалов влажности.

Если параметры наружного воздуха находятся на продолжении прямой ПУ, характеризующей процесс изменения тепловлажностной характеристики продуваемого воздуха, в сторону уменьшения значений относительной влажности и потенциала влажности, например точка Н с параметрами $t_Н$, $\varphi_Н$, $d_Н$, $I_Н$, $\theta_Н$ (рисунок 4.28), то обработка воздуха перед подачей в хранилище не требуется. Определенное количество наружного воздуха смешивается с удаляемым в пропорции УП/ПН и с параметрами точки П - $t_П$, $\varphi_П$, $d_П$, $I_П$, $\theta_П$ поступает в насыпь. В результате смешивания приточного воздуха с рециркуляционным меняются параметры подаваемого в насыпь воздуха, достигая оптимальных значений - точка П: $t_П > t_Н$, $\varphi_П > \varphi_Н$, $d_П > d_Н$, $I_П > I_Н$, $\theta_П > \theta_Н$. Сорбирующий потенциал воздуха уменьшается на величину разности потенциалов $\Delta\theta_{ПН} = \theta_П - \theta_Н > 0$. Интенсивность влагопотока определяется разностью потенциалов $\Delta\theta_{ПУ} = \theta_У - \theta_П > 0$, при этом потери продукции при хранении становятся минимальными, определяемыми дыханием продукции.

Если параметры наружного воздуха находятся ниже продолжения прямой ПУ, например точка $Н_1$ (рисунок 4.28), то необходим дополнительный нагрев от точки $Н_1$ до точки К, лежащей на прямой принадлежащей линии ПУ. Отсутствие предварительного подогрева может повлечь частичную конденсацию водяных па-

ров из смеси воздуха (процесс $Н_1$–У) и возможное поступление в насыпь капельной влаги, что недопустимо.

Если параметры наружного воздуха находятся в области ограниченной линией $I_П$ = const и изотермой $t_П$, например точка $Н_2$ с параметрами $t_{Н2}$, $\varphi_{Н2}$, $d_{Н2}$, $I_{Н2}$, $\theta_{Н2}$ (рисунок 4.29), то необходимо охлаждение наружного воздуха – процесс $Н_2$–$К_1$ или изоэнтальпийный процесс $Н_2$–$К_2$ для достижения параметров, лежащих на продолжении прямой ПУ, для минимизации потерь продукции вызванных усушкой.

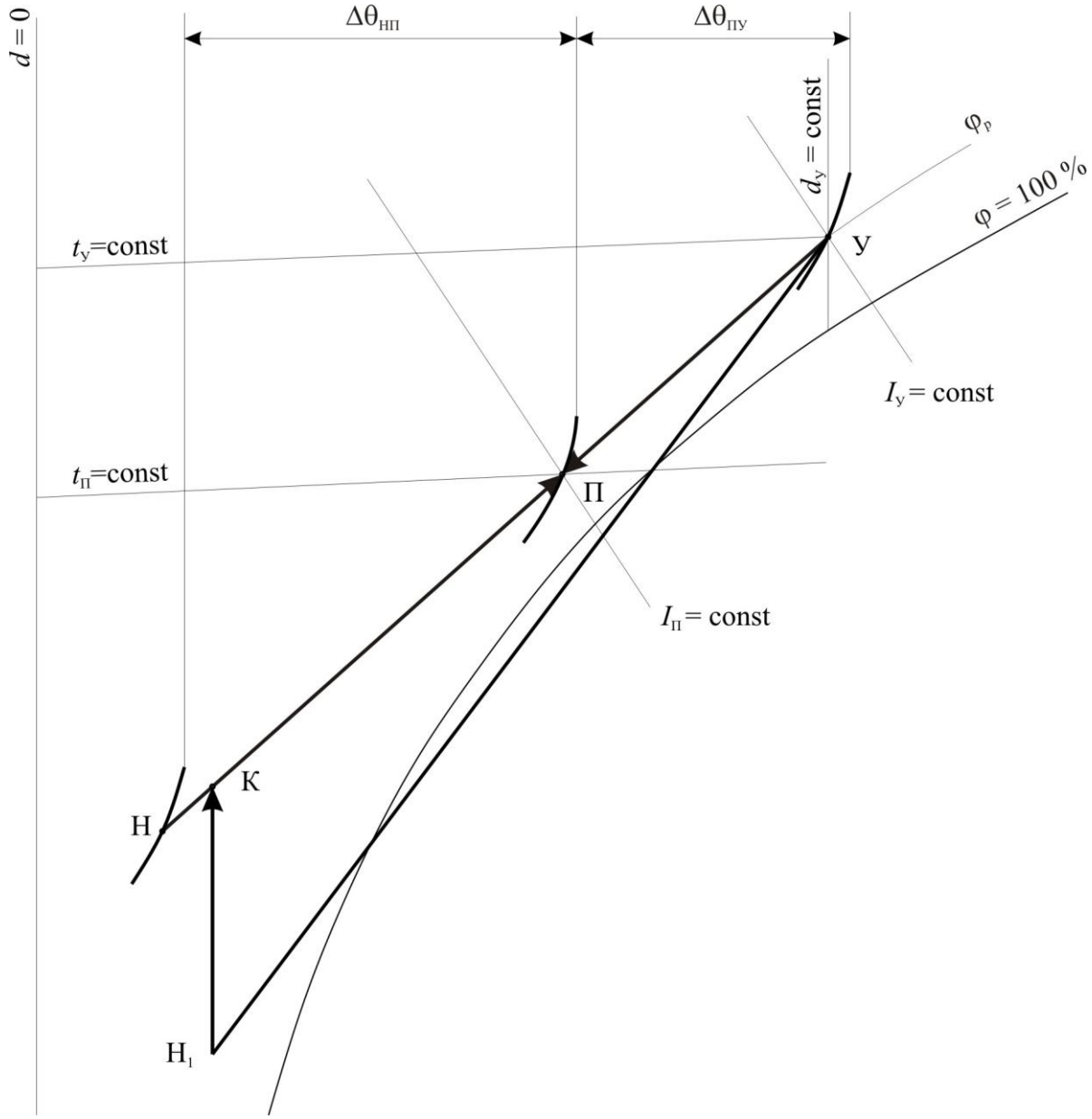


Рисунок 4.28 – Процесс подготовки воздуха на I–d–θ-диаграмме (вариант 1)

Отказ от искусственного охлаждения и смешивание наружного воздуха параметрами точки $Н_2$ с воздухом удаляемым из хранилища с параметрами точки У приведет к увеличению доли наружного воздуха для достижения условия оптимальной температуры подаваемого в хранилище воздуха - точка $П_1$, лежащая на изотерме $t_П$. В результате интенсивность влагопотока $\Delta\theta_{П1У}$ возрастет на величину $\Delta\theta_{П1П} = \theta_П - \theta_{П1}$, относительно интенсивности влагопотока определяемого дыханием сырья $\Delta\theta_{ПУ}$, что приведет к дополнительной усушке продукции и потерям.

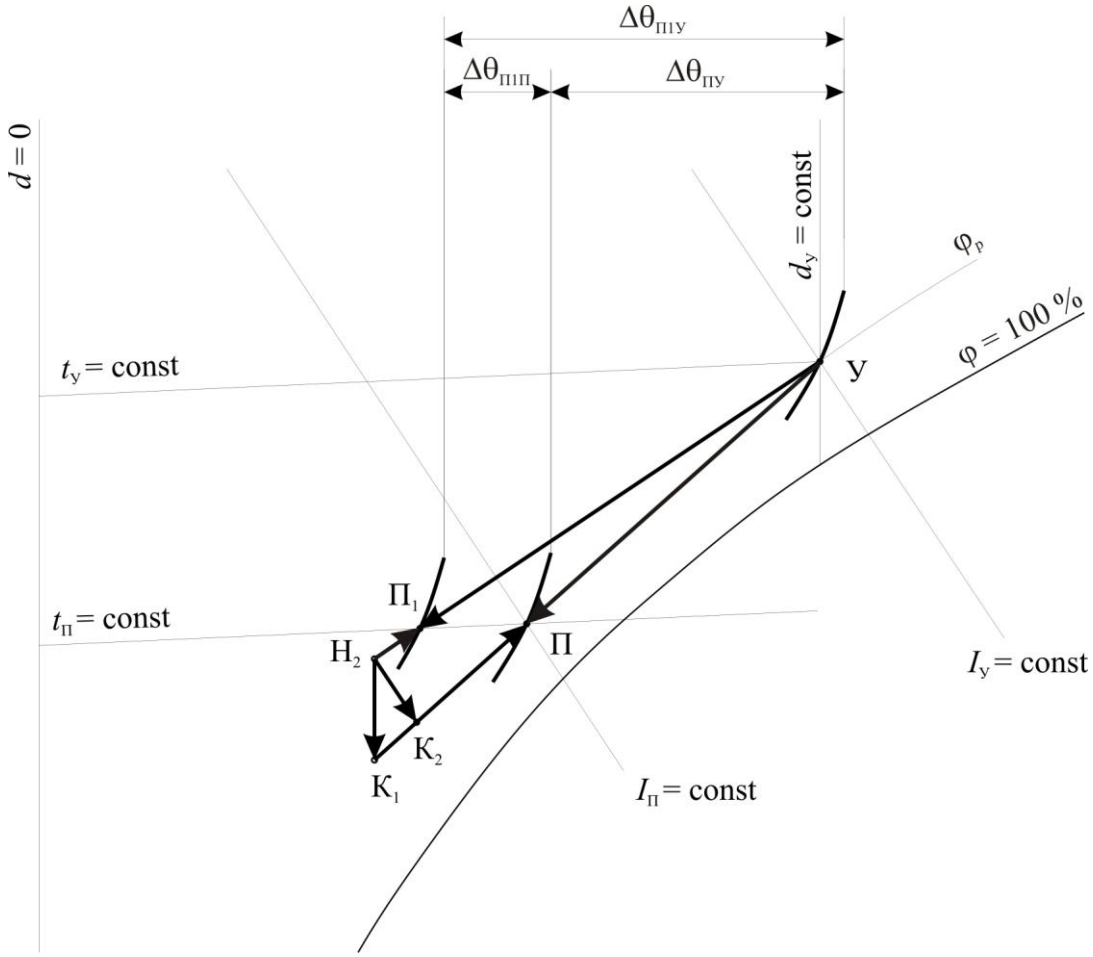


Рисунок 4.29 – Процесс подготовки воздуха на *I*–*d*–θ-диаграмме (вариант 2)

Если параметры наружного воздуха находятся левее линии ПУ и ограничены изотермами $t_П$ и $t_У$, например точка $Н_3$ с параметрами $t_{Н3}$, $\varphi_{Н3}$, $d_{Н3}$, $I_{Н3}$, $\theta_{Н3}$ (рисунок 4.30), то возможно подавать в хранилище не обработанный наружный воздух - процесс $Н_3$–У, который ассимилируя влагу из насыпи сырья с интенсивностью определяемой разностью потенциалов $\Delta\theta_{Н3У} = \theta_У - \theta_{Н3} > 0$, может не достичь величины равновесной влажности $\varphi_р$ и процесс отклониться от $Н_3$–У и ста-

нет $Н_3$–$У_1$, а потери продукции возрастут и будут определяться разностью потенциалов влажности $\Delta\theta_{уу1} = \theta_{у1} - \theta_у$. Создание условий для снижения потерь до биологически оправданного уровня возможно применяя процесс охлаждения наружного воздуха – процесс $Н_3$–$К_4$ или $Н_3$–$К_3$ (если параметры наружного воздуха лежат правее линии $I_П$, например точка $Н_4$, то изоэнтальпийное охлаждение нежелательно, т.к. приведет к увеличению расхода подаваемого воздуха и отклонению от оптимальных температурно-влажностных условий хранения) с последующим смешением с удаляемым из хранилища воздухом.

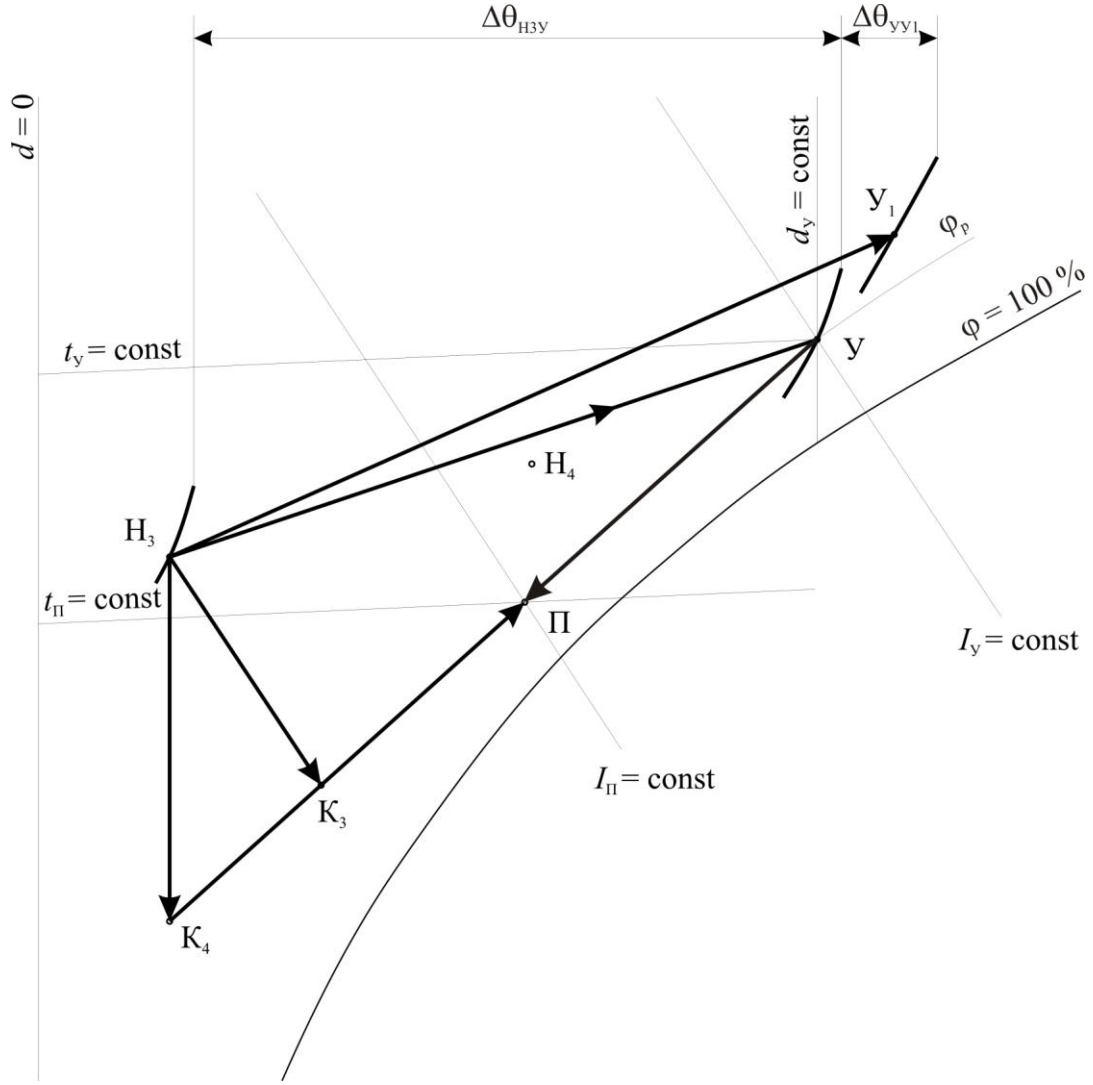


Рисунок 4.30 – Процесс подготовки воздуха на I–d–θ-диаграмме (вариант 3)

Если параметры наружного воздуха ограничены изотермой $t_У$ и изоэнтальпой $I_У$, например точка $Н_5$ с параметрами $t_{Н5}$, $\varphi_{Н5}$, $d_{Н5}$, $I_{Н5}$, $\theta_{Н5}$ (рисунок 4.31), то подача в хранилище необработанного наружного воздуха недопустима, т.к. вызовет значительные потери от несоблюдения температурного режима (внесение с

подаваемым воздухом дополнительной теплоты) и от усушки продукции ввиду возрастания разности потенциалов $\Delta\theta_{Н5У} = \theta_У - \theta_{Н5} > \Delta\theta_{ПУ}$. Рекомендуется охлаждение с применением холодильных машин – процесс $Н_5$–$К_5$, адиабатное охлаждение - процесс $Н_6$–$К_6$ (процесс $Н_6$–$К_6$ возможен, если параметры наружного воздуха лежат ниже изоэнтальпы $I_П$), с последующим смешением с удаляемым из хранилища воздухом. При определенных условиях (если параметры наружного воздуха лежат правее линии $I_П$ = const) применение адиабатного охлаждения не желательно, например процесс $Н_7$–$П_2$, который приведет к увеличению расхода подаваемого воздуха и отклонению от оптимальных температурных условий хранения.

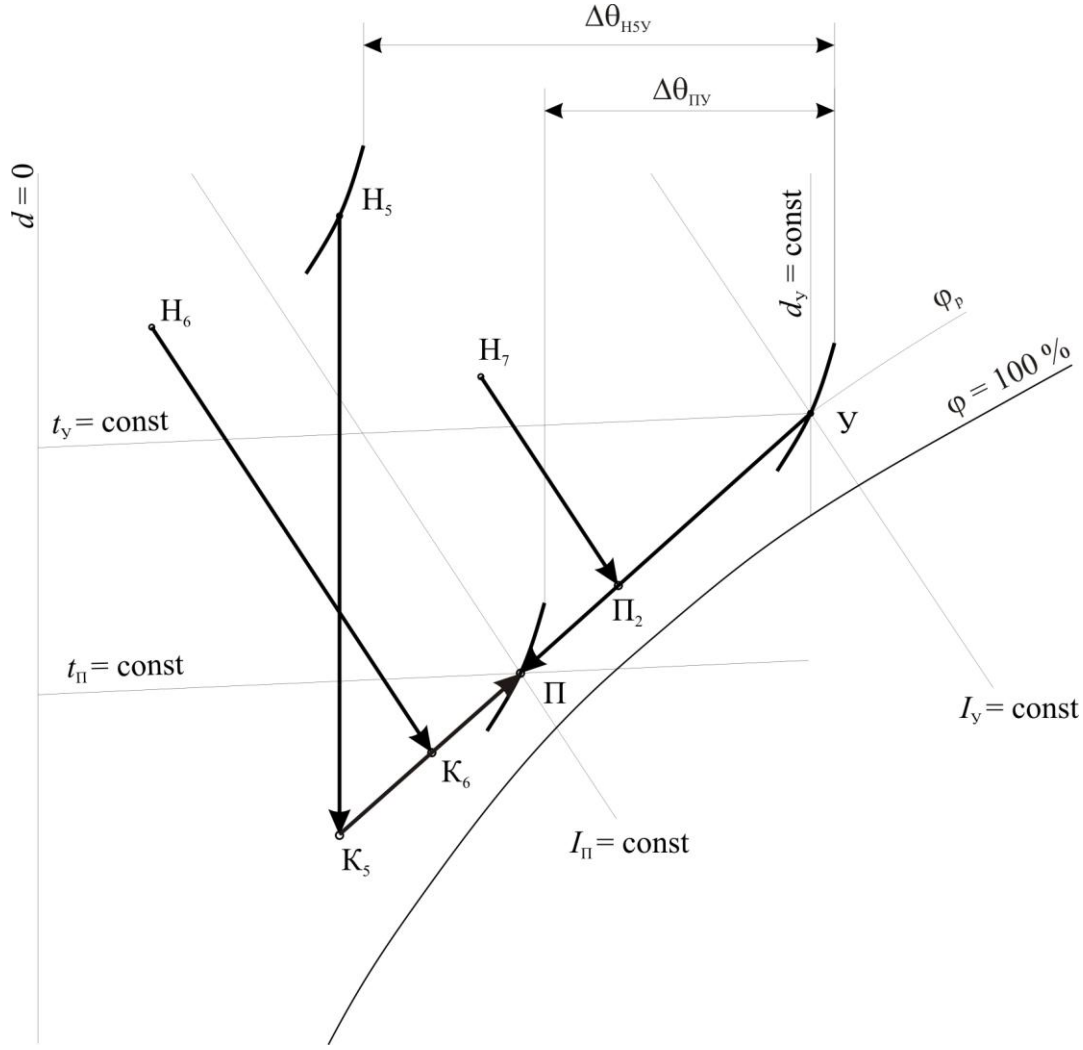


Рисунок 4.31 – Процесс подготовки воздуха на I–d–θ-диаграмме (вариант 4)

Если параметры наружного воздуха ограничены линиями $I_У$ = const и $d_У$ = const, например точка $Н_8$ с параметрами $t_{Н8}$, $\varphi_{Н8}$, $d_{Н8}$, $I_{Н8}$, $\theta_{Н8}$ (рисунок 4.32), то удалить

накопленную влагу из слоя хранящейся продукции возможно, т.к. потенциал влажности рассматриваемого участка ниже потенциала влажности удаляемого из насыпи воздуха $\Delta\theta_{Н8У} > \Delta\theta_{ПУ} > 0$, но ассимилировать тепло из насыпи предварительно неохлажденным наружным воздухом невозможно, применение холодильных машин обязательно. Например для точки $Н_8$ возможен процесс охлаждения $Н_8$–$К_7$ с температурой поверхности воздухоохладителей выше температуры точки росы $t_р$, процесс $Н_9$–$К_7$ (параметры наружного воздуха находятся правее линии $d_{К5}$ = const) происходит с температурой поверхности воздухоохладителей ниже температуры точки росы $t_р$. Применение рециркуляции, перед подачей воздуха с параметрами точки С в секцию охлаждения экономит расход холода.

Если параметры наружного воздуха находятся правее линии $d_У = \text{const}$ (рисунок 4.32), то довести параметры подаваемого в хранилище воздуха до оптимальных возможно только при охлаждении с дальнейшей обработкой аналогично процессам для параметров наружного воздуха в области ограниченной линиями $I_У$ = const и $d_У$ = const.

Следует отметить, что рассмотренные процессы тепломассообмена при различных способах обработки приточного воздуха на I–d–θ-диаграмме позволяют обрабатывать воздух с одной и той же последовательностью для характерных граничных условий параметров наружного воздуха с учетом интенсивности тепломасообменных процессов в хранилище характеризуемых потенциалом влажности.

Для повышения энергоэффективности процесса хранения, окончательное определение схемы подготовки воздуха должно основываться на минимальных значениях расхода тепла, холода, электроэнергии и потерь хранящейся биологически активной продукции [165].

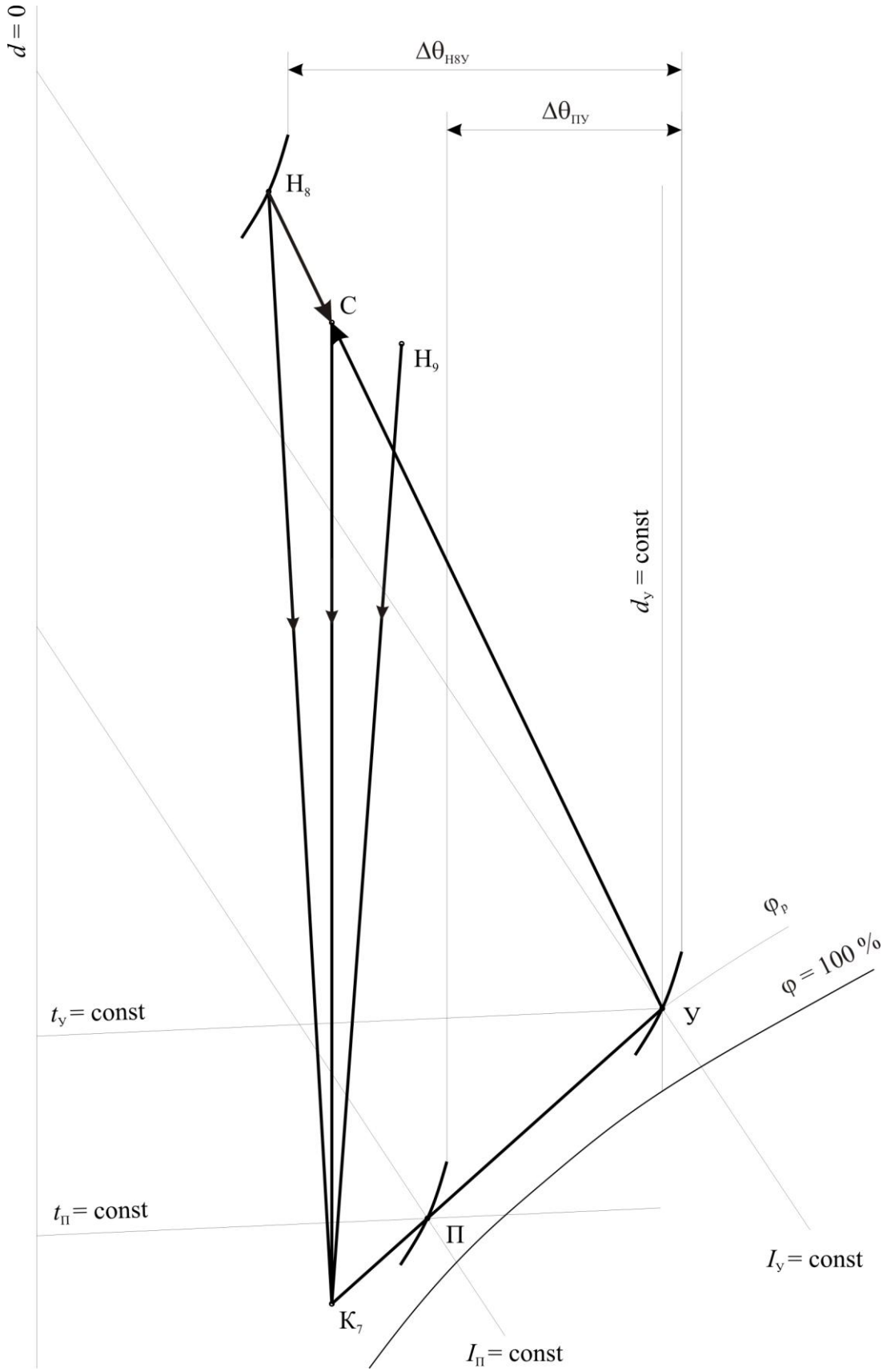


Рисунок 4.32 – Процесс подготовки воздуха на *I*–*d*–θ-диаграмме (вариант 5)

4.2. Использование естественных источников энергии в процессах сушки и хранения биологически активного сырья

4.2.1. Исследования динамики изменения параметров атмосферного воздуха как агента сушки

Качество заготавливаемого сена и зерна напрямую зависит от параметров сушильного агента. Как отмечалось ранее, из всех существующих способов сушки растительного сырья наиболее эффективным считается искусственная сушка методом активного вентилирования, при этом наименее энергоемка продувка неподогретым атмосферным воздухом. Однако применение наружного воздуха в качестве агента сушки ограничивается климатическими условиями, несмотря на то, что в период заготовки кормов (июнь – август) наблюдаются максимальные значения температуры $t_н$ и минимальные значения относительной влажности воздуха $\varphi_н$.

В качестве показателя, позволяющего оценить возможность использования естественной теплоты, используется коэффициент обеспеченности требуемых параметров наружного климата для сушки $К_{об}$, величина которого показывает долю общего числа случаев, не допускающих отклонение от расчетных условий, и определяется по формуле (3.23).

Обеспеченность появления двух зависимых параметров $К_{об}$ ($t_н$, $\varphi_н$), т.е. появления одновременно определенной температуры и определенной относительной влажности равна [27]:

$$К_{об}(t_н, \varphi_н) = К_{об}(t_н) \cdot К_{об}(\varphi_н / t_н), \qquad (4.36)$$

где $К_{об}$ ($t_н$) – обеспеченность появления заданной температуры наружного воздуха; $К_{об}$ ($\varphi_н$ /$t_н$) – условная обеспеченность появления относительной влажности $\varphi_н$ при заданной температуре $t_н$.

При обработке климатических данных расчетное изменение температуры наружного воздуха должно соответствовать заданному коэффициенту обеспеченности $К_{об}(t_н)$ = $К_{об}$ ($t_н$, $\varphi_н$), а расчетное значение относительной влажности принимается исходя из наиболее невыгодного сочетания параметров (наибольшие значения $\varphi_н$ при различных $t_н$), т.е. сочетания, отвечающего условию $К_{об}$ ($\varphi_н$ /$t_н$) = 1.

Анализ динамики тепломассообменных процессов при сушки биологически активного сырья показал, что для получения высококачественного сена или зерна при сушке неподогретым воздухом минимальные значения температуры наружного воздуха должны быть не ниже 16,5…17,0 °С, а относительной влажности не более 75 %.

Нами проведена оценка обеспеченности параметров наружного климата для осуществления процесса сушки растительного сырья в условиях Самарской области, климат которой характерен для большинства регионов Поволжья. Значение $К_{об}$ в период заготовки сена и зерна определены по результатам статистической обработки метеорологических данных за период с 1997 по 2007 г. Величина $К_{об}$, рассчитанная по среднемесячным значениям относительной влажности и температуры за три летних месяца, определяется путем построения статистического ряда. Анализ полученных данных показал, что обеспеченность минимальных требуемых параметров $К_{об}$ = 0,99. При этом среднемесячная температура воздуха в летние месяцы выше 20 °С наблюдалась в 43 % случаях, $\varphi_н$ < 70 % регистрировалась в 83 % случаев. Параметры атмосферного воздуха в обозначенный период при $К_{об}$ = 0,85 составляют $t_н$ > 18 °С и $\varphi_н$ < 70 %.

Аналогичный расчет по среднесуточным значениям дал следующий результат: обеспеченность минимальных допустимых значений параметров воздуха составляет 0,93 для температуры и 0,98 для относительной влажности; среднемесячные значения $t_н$ и $\varphi_н$ составляют при $К_{об}$ = 0,9 соответственно 20 °С и 50 %.

Однако такой расчет является лишь приближенным и может быть применен только для предварительного анализа климатических условий. Для более точного рассмотрения вопроса предлагается определять значение $К_{об}$ по среднемесячному ходу температур (рисунок 4.33), который дает не только наглядное представление о динамике температур в течение летнего периода, но и позволяет оценить возможность сушки за любой временной промежуток (от 1 дня до 3 месяцев).

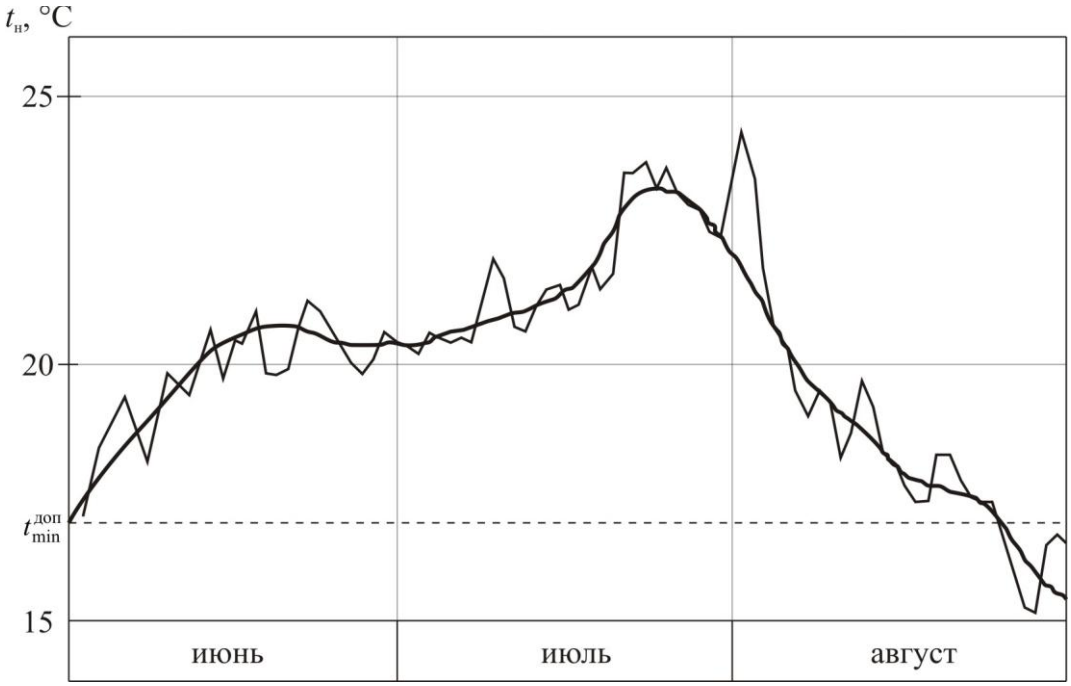


Рисунок 4.33 – Ход среднемесячных температур в Самарской области (осреднение за 10 лет)

Среднесуточная температура наружного воздуха по Самарской области не достигает минимального требуемого значения только в конце августа, небольшая вероятность низких температур атмосферного воздуха наблюдается в начале июня. В то же время с середины июня до начала августа обеспеченность параметров максимальная и составляет $К_{об}$ = 0,99 для $t_н$ = 20 °C. Коэффициент обеспеченности $t_н$ > 17 °C за летние месяцы равен $К_{об}$ = 0,9. Учитывая тот факт, что продувку растительного сырья осуществляют в течение 8…10 часов в сутки, часто возникает необходимость расчета $К_{об}$ в определенный период суток. Поэтому особое значение при оценке возможности сушки растительного сырья атмосферным воздухом имеет суточное изменение температуры (рисунок 4.34) и амплитуда среднесуточного колебания $\Delta t_а$. Наиболее благоприятные условия для сушки растительного сырья неподогретым воздухом складываются в течение дня в интервале с 10 до 20 часов; минимальная обеспеченность требуемых параметров составляет более 0,9.

Приведенные данные позволяют сделать вывод о возможности использования атмосферного воздуха в качестве сушильного агента без предварительной его обработки на территории Самарской области с минимальным коэффициентом обеспеченности $К_{об}$ = 0,9 не менее 10 часов в сутки.

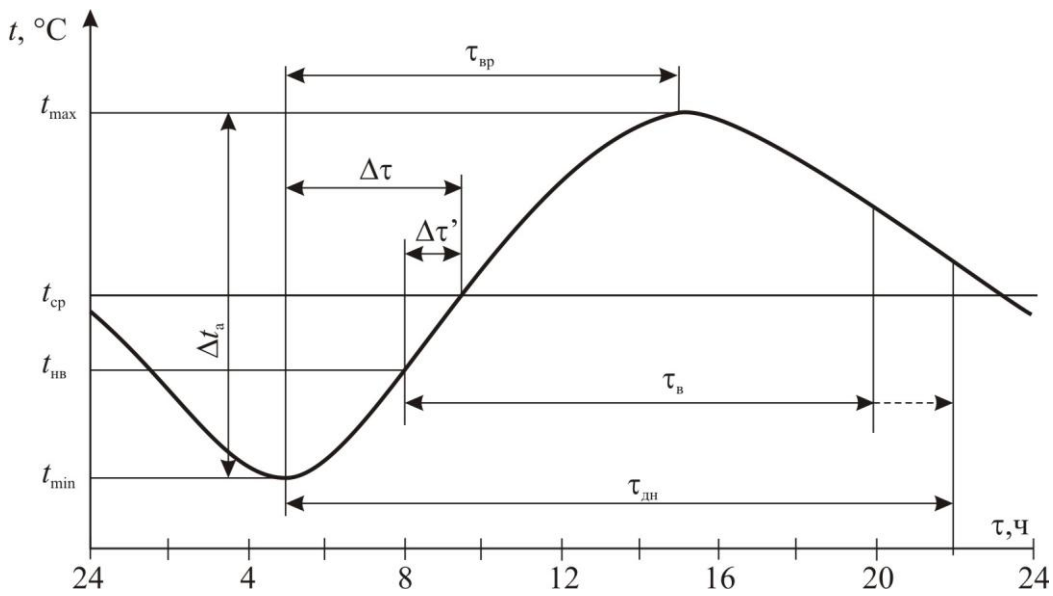


Рисунок 4.34 – Изменение суточной температуры наружного воздуха в июне - августе

Учитывая высокую интенсивность солнечного излучения в летние месяцы, целесообразности использования гелиоустановок для дополнительного подогрева продувочного воздуха на 5…10 °С с целью интенсификации процесса сушки биологически активного сырья. Обеспеченность минимально допустимых параметров воздуха в этом случае составит $К_{об}$ = 0,99 на весь период послеуборочной обработки растительной продукции [158].

В практике послеуборочной обработки биологически активной продукции часто имеют место случаи, когда процесс вентилирования начинают раньше, чем температура атмосферного воздуха достигнет своего среднесуточного значения. Если при этом среднесуточная температура $t_{ср}$ равна минимально допустимой по технологии $t_{\min}^{доп}$, то в течение промежутка времени $\Delta\tau'$ для нормального ведения процесса сушки требуется дополнительный подогрев агента сушки. Поэтому определение коэффициента обеспеченности по среднесуточной температуре воздуха может привести к завышенным значениям $К_{об}$ и, как следствие, низкому качеству готовой продукции из-за нарушения технологии. Предлагается проводить оценку обеспеченности параметров наружного климата по температуре воздуха в начале вентилирования $t_{нв}$, которая по физическому смыслу сходна подобной величине, используемой при оценке возможности использования естественного холода [102].

Если процесс вентилирования осуществляется до захода солнца величина начальной температуры вентилирования $t_{нв}$, °С, может быть определена следующим образом:

$$t_{нв} = t_{ср} - \frac{0{,}5\Delta t_а(\Delta\tau - \tau_{дн} + \tau_в)}{\Delta\tau}, \qquad (4.37)$$

где $\Delta t_а$ – амплитуда среднесуточного колебания температуры наружного воздуха для расчетного месяца, °С;

$\tau_{дн}$ – продолжительность дня (время от восхода до захода солнца), ч;

$\tau_в$ – продолжительность вентилирования, ч;

$\Delta\tau$ – время от восхода солнца до точки совпадения температурной кривой со средней температурой наружного воздуха, ч.

Если же продувка заканчивается раньше захода солнца, то начальная температура вентилирования будет равна:

$$t_{нв} = t_{ср} - \frac{\Delta t_а \cdot \Delta\tau'}{\tau_{вр}}, \qquad (4.38)$$

где $\Delta\tau'$ – время от начала вентилирования до точки совпадения температурной кривой со средней температурой наружного воздуха, ч;

$\tau_{вр}$ – продолжительность возрастания температуры (время от восхода солнца до достижения максимальной температуры), ч.

Так как при минимальном значении температуры величина коэффициента максимальна, то при расчете $К_{об}$ по среднестатистическому ряду за расчетную величину следует принимать:

$$t_{min}^{доп} = t_{ср} + (t_{ср} - t_{нв}), \qquad (4.39)$$

Искусственное завышение минимальной требуемой температуры, когда $t_{ср}$ близка к $t_{min}^{доп}$, позволяет избежать ошибки при инженерных расчетах сушки и более точно оценить возможность использования неподогретого атмосферного воздуха в качестве сушильного агента при активном вентилировании сельскохозяйственной продукции [165].

4.2.2. Исследования динамики изменения параметров атмосферного воздуха как источника естественного холода

Применение естественного холода приводит к повышению энергоэффективности хранения СРС. Наиболее сильно это прослеживается в период охлаждения продукции, как наиболее напряженный с точки зрения расхода холода (таблица 4.2).

Таблица 4.2 – Сроки периода охлаждения и начальная температура продукции[187]

	Картофель	Корнеплоды	Капуста	Лук
Начальная температура $t_{к.о}$, °С	15	10	10	18
Период охлаждения	10.10…10.11	10.10…25.10	15.10…30.10	15.09…30.09

В начальный период охлаждения, характеризуемый максимальной теплонапряженностью, насыпь должна обрабатываться воздухом с начальной температурой $t_{в.о}$, равной для картофеля $t_{во} \le t_к = 2$ °С, для корнеплодов $t_{во} \le t_к = 0{,}5…1{,}0$ °С, для капусты $t_{в.о} \le t_к = 0$ °С [35]. Время работы вентиляции период охлаждения $К_в$ = 0,3…0,35 ($\tau_в$ = 7,5…8,0 ч в сутки) [42], что дает возможность использовать только более холодный воздух ночью.

Применение естественного холода при охлаждении биологически активной продукции в зависимости от климатического района предложено и обосновано в [102].

Вместо общепринятой среднесуточной температуры предлагается принять следующую температуру наружного воздуха:

$$t_н^н = 0{,}5(t_{н.в} + t_{ср}) - 0{,}25\Delta t_а \ . \qquad (4.40)$$

Температура наружного воздуха в начале вентилирования $t_{н.в}$ равна:

$$t_{н.в} = t_{ср} - \frac{0{,}5 \cdot \Delta t_а (\tau_н - \Delta\tau - 24К_в)}{\tau_н - \Delta\tau}, \qquad (4.41)$$

где $\tau_н$ – длительность ночи, ч; $\Delta\tau$ – время необходимое для совпадения температурной кривой с температурой наружного воздуха, ч; $\Delta t_а$ – амплитуда среднесуточного колебания температуры наружного воздуха для расчетного месяца,°С,

определяется по СП [260]; $t_{ср}$ – среднесуточная температура наружного воздуха,°С.

Исследования динамики температуры атмосферного воздуха как источника естественного холода для различных регионов страны представлены в [35]. Однако, оценка только температурных характеристик наружного климата является не совсем корректной. Для обеспечения высокой сохранности продукции необходимо рассмотреть возможность использования необработанного наружного воздуха с позиции теории потенциала влажности.

Оценка возможности использования необработанного атмосферного воздуха при хранении СРС проводилась для климатических условий Самарской и Нижегородской областей, климат которых характерен для южной и северной части Среднего Поволжья.

Расчет потенциалов влажности наружного воздуха проводился по среднесуточным значениям температуры $t_н$, °С, и относительной влажности $\varphi_н$, %, наружного воздуха для периода с 1997 по 2007 гг.

Оптимальные значения температуры $t_к$, относительной влажности $\varphi_к$ и потенциала влажности воздуха $\theta_к$, поддерживаемые в хранилище, представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Оптимальные параметры воздуха в хранилище

	Картофель	Корнеплоды	Капуста
Температура $t_к$, °С	2	05…1,0	0
Относительная влажность, $\varphi_к$, %	90-95	90-95	95-97
Потенциал влажности, $\theta_к$, °В	11,54	11,90	12,51

На основе полученных значений потенциала влажности наружного воздуха и оптимальных параметров воздуха в хранилище построен график, характеризующий потребность регулирования потенциала влажности подаваемого в хранилище воздуха (рисунок 4.35).

К 10 октября в климатических условиях Самарской области наблюдаются избыточные значения потенциала влажности в приточном воздухе:

– для капусты: $\Delta\theta = \theta_а - \theta_б = 14{,}50 - 12{,}51 = 1{,}99$ °В (ордината а–б);

– для корнеплодов: $\Delta\theta = \theta_а - \theta_в = 14{,}50 - 11{,}90 = 2{,}60$ °В (ордината а–в);

– для картофеля: $\Delta\theta = \theta_а - \theta_г = 14{,}50 - 11{,}54 = 2{,}96$ °В (ордината а–г).

К 15 октября устанавливаются близкие к оптимальным значения потенциала влажности подаваемого в хранилище воздуха (ординаты е–д, е–ж, е–и).

Для Нижегородской области близкие к оптимальным значения потенциала влажности наружного воздуха устанавливаются к 10 октября (ординаты к–г, к–в, к–б).

Дефицит потенциала влажности подаваемого в хранилище воздуха увеличивается к 15 октября и достигает:

– для капусты: $\Delta\theta = \theta_л - \theta_д = 10{,}90 - 12{,}51 = -1{,}61$ °В (ордината л–д);

– для корнеплодов: $\Delta\theta = \theta_л - \theta_ж = 10{,}90 - 11{,}90 = -1{,}00$ °В (ордината л–ж);

– для картофеля: $\Delta\theta = \theta_л - \theta_и = 10{,}90 - 11{,}54 = 0{,}64$ °В (ордината л–и).

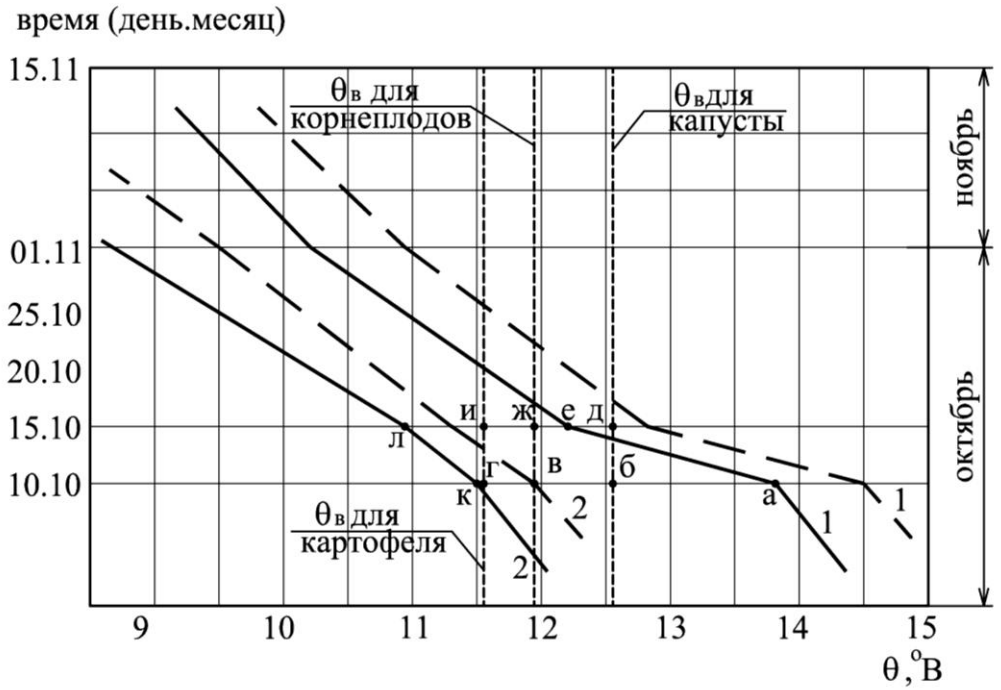


Рисунок 4.35 – Определение потребности в корректировке потенциала влажности подаваемого в хранилище СРС воздуха: - - - - - линия среднемесячных потенциалов влажности наружного воздуха $t_{ср}$; ——— линия потенциалов влажности подаваемого в хранилище воздуха $t_{во}$; 1 – г. Тольятти; г. 2 – Нижний Новгород.

Таким образом, в климатических условиях Самарской области избыток потенциала влажности подаваемого в хранилище воздуха наблюдается до середины

октября, что свидетельствует о необходимости осушение воздуха. Оптимальные значения потенциала влажности наружного воздуха находятся в период с 15 по 30 октября. С начала ноября наблюдается дефицит потенциала влажности подаваемого в хранилище воздуха - рекомендуется увлажнять подаваемый в хранилище воздух или применять рециркуляцию. Обеспеченность параметров наружного воздуха для условий хранения составляет $К_{об}$ = 0,45.

В климатических условиях Нижегородской области в начальный период хранения и до 15 октября значения потенциала влажности наружного воздуха находятся в оптимальном диапазоне, после 15 октября требуется обработка наружного воздуха перед подачей в хранилище. Использование необработанного наружного воздуха в системах вентиляции хранилищ сочного растительного сырья возможно с обеспеченностью $К_{об}$ = 0,35.

Таким образом, учет не только температурных, но и влажностных характеристик наружного климата ограничивает возможность использования необработанного воздуха в системах обеспечения параметров микроклимата в хранилищах биологически активной продукции. В тоже время, обоснованное применение естественного холода в зависимости от климатических условий рассматриваемого региона, позволяет отказаться от искусственных источников холода, что приводит к повышению энергоэффективности процесса хранения СРС [35, 165].

4.3. Натурные исследования процессов сушки и хранения растительного сырья

Разработанная модель формирования температурно-влажностных параметров воздуха в слое биологически активной продукции при активном вентилировании с помощью I–d–θ-диаграммы является теоретико-экспериментальной. Выбор методики эксперимента, экспериментальная база исследований, планирование и необходимый объем проводимых натурных исследований определялись необходимостью получения информации для решения трех основных задач:

– подтверждение достоверности положений и обоснованности допущений, принятых при разработке теплофизической модели процессов тепломассопереноса в

слое сохнущего биологически активного материала;

– выявление особенностей динамики состояния параметров воздуха в слое;

– определение обеспеченности результатов исследований в практике проектирования и эксплуатации установок послеуборочной обработки растительного сырья.

Планирование экспериментальных исследований, т.е. выбор достаточного числа и оптимальных условий проведения опытов, необходимых для решения поставленной задачи с требуемой точностью, проводилось нами с учетом биологической активности изучаемого объекта.

Планирование эксперимента включает в себя:

– обеспечение минимального числа опытов и времени их проведения;

– реализацию специальных планов эксперимента, предусматривающих одновременное варьирование всех параметров и использование аппарата математической статистики для формализации экспериментов и принятия обоснованных решений после каждой серии опытов.

Экспериментальные исследования проводятся с целью установления однофакторной зависимости $y = f(x)$, при условии неизменности остальных факторов, для чего требуется проведение не менее 4…5 серий опытов [8, 288]. При большом количестве первичных факторов, влияющих на искомый параметр, число опытов резко возрастает. Если каждому из i факторов задавать M уровней, то число опытов составит $N = M^i$, что достаточно затруднительно реализовать в практических условиях исследований.

Дополнительным требованием к планированию экспериментов с биологически активным материалом является трехкратная повторяемость опытов [197].

Отмеченные выше особенности планирования эксперимента в биологически активных средах, а также многообразие внутренних и внешних факторов, влияющих на результат исследований, определили необходимость проведения эксперимента в натурных условиях.

4.3.1. Экспериментальные исследования процесса сушки

На интенсивность процесса сушки растительного сырья значительное влияние оказывают биологические тепловыделения. Так как в лабораторных условиях практически невозможно смоделировать штабель, геометрически соизмеримый с реальной насыпью, основной задачей проводимых исследований являлось выявление интенсивности внутренних тепловыделений в слое за счет теплоты дыхания и аккумулированной теплоты (в режиме естественной конвекции при отключенных САВ), а также оценка их влияния на интенсивность процессов тепломассопереноса при активном вентилировании.

Натурные исследования были выполнены в сельско-промышленном комбинате «Жигули» Самарской области в 2004 г. Опыты проводились на промышленных площадках для сушки и хранения сена и зерна.

Скошенная трава после предварительного провяливания в поле до влажности $w_{тр}$ = 30…60 % укладывалась в скирды размером 20х7х6 м в один прием. Масса сена кондиционной влажности в скирде из бобовых трав составляла 53…58 т, из злаковых 50…53 т.

Замеры температуры и относительной влажности в скирде производились в 11 сечениях (по вертикали) на двух горизонтальных уровнях (на высотах 1 и 2 м). Общее количество контрольных точек составляло 88 за один опыт (рисунок 4.36).

Для определения температур воздуха на различной глубине стога был использован термовлагощуп, позволяющий одновременно фиксировать локальные значения температуры $t_в$ и относительной влажности воздуха $\varphi_в$ в слое растительной продукции.

Схема работы и устройство термовлагощупа представлено на рисунке 4.37. Он состоит из 5 стальных трубок (1), соединенных между собой легкоразъемными муфтами (2). Длина каждой трубки составляет 300 мм, диаметр – 10 мм, общая длина конструкции достигает 2 м. В полость соединительных перфорированных муфт помещалась фильтровальная бумага, по равновесной влажности которой определялись относительная влажность воздуха и в дальнейшем влажность травы.

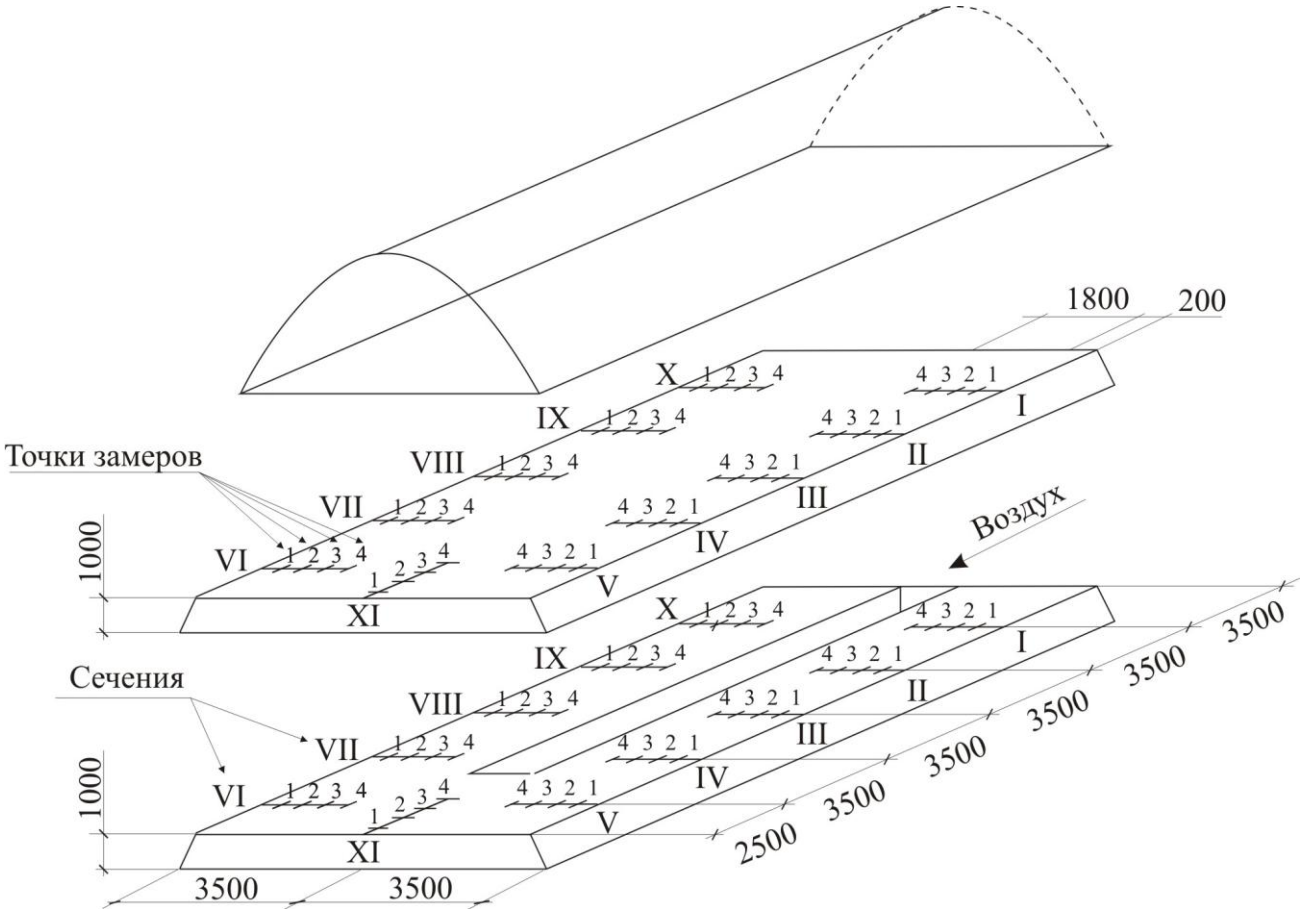


Рисунок 4.36 – Места замера температуры и относительной влажности воздуха в скирде рассыпного сена

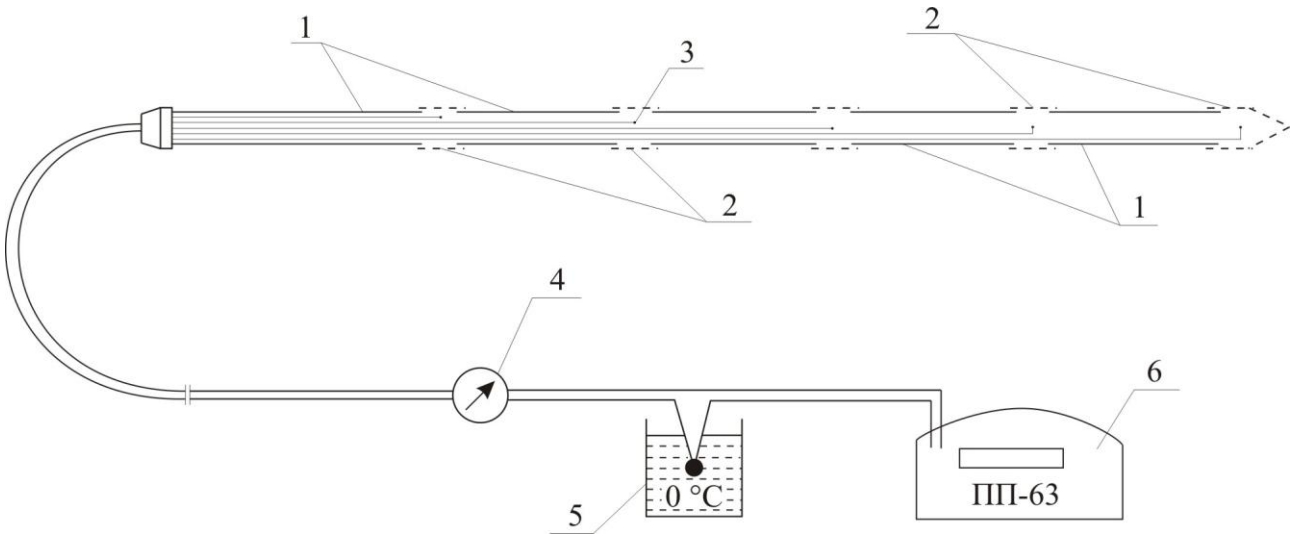


Рисунок 4.37 – Схема устройства и работы термовлагощупа

Для измерения температуры в разъемы муфт помещались медно-константановые термопары (3), включение-отключение которых осуществлялось многопозиционным переключателем (4). Холодные концы термопар помещались в термос с тающим льдом (5). Для измерения термо э.д.с. в качестве вторичного

прибора использовался переносной потенциометр постоянного тока ПП-63 (6). Погрешность измерения температуры не превышает ±1 °С.Замеры темпа самосогревания сохнущей травы ($\Delta t/\Delta\tau$) проводились в скирдах в ночное время при неработающих САВ. Неодинаковая влажность сена после провяливания в поле послужила причиной изменения локальной интенсивности биологических тепловыделений. В связи с этим выявить темп самосогревания травы во всем объеме скирды не удалось.

Значения скорости самосогревания в каждом из сечений $\Delta t/\Delta\tau$ и средней скорости $(\Delta t/\Delta\tau)_{ср}$, обобщенные по отдельным зонам скирды, приведены в приложении 7. Экспериментально выявленное изменение скорости самосогревания от влажности травы показано в виде графика на рисунке 4.38.

Влияние сортового состава сена на интенсивность самосогревания в процессе натурного эксперимента не выявлено.

Проведение аналогичного эксперимента по выявлению темпа самосогревания зерна является сложной задачей ввиду необходимости высокой точности измерений. Поэтому для построения зависимостей $\Delta t/\Delta\tau = f(w_з)$ нами были использованы экспериментальные зависимости выделения CO_2 от влажности зерна, полученные различными авторами [99, 117, 241] (рисунок 4.39).

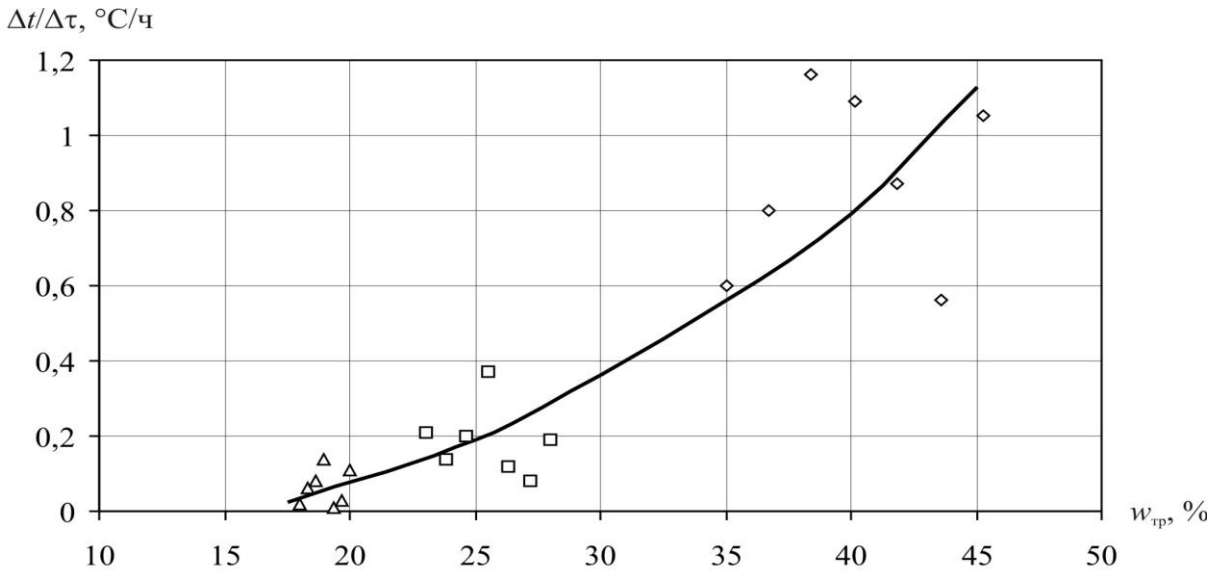


Рисунок 4.38 – Зависимость темпа согревания от влажности травы

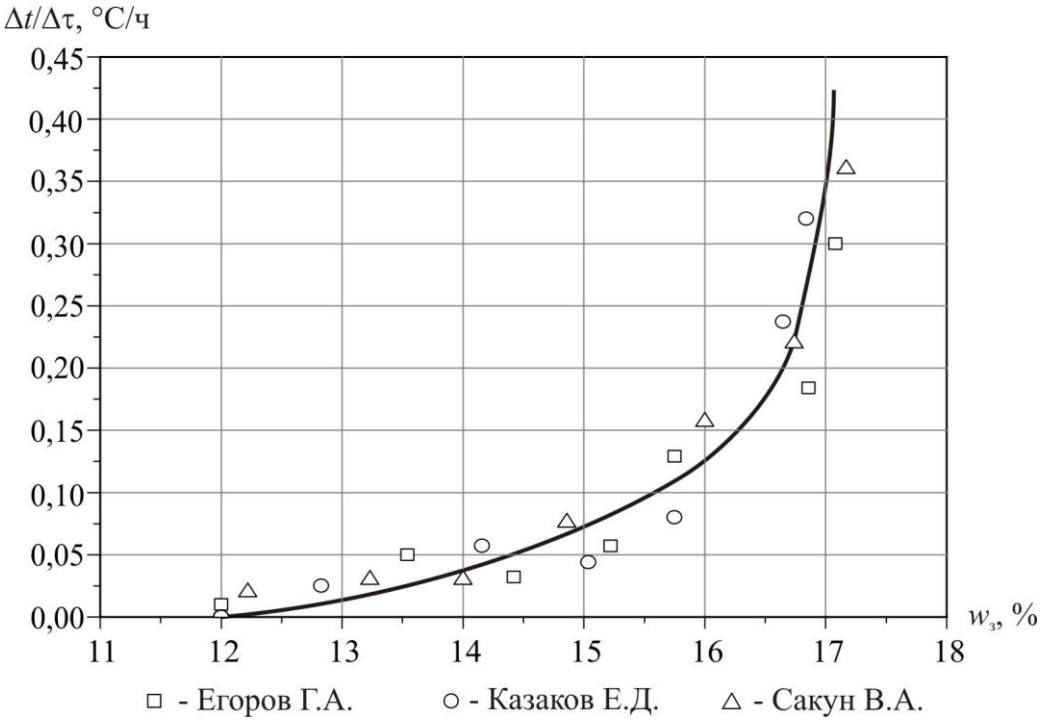


Рисунок 4.39 – Зависимость темпа согревания от влажности зерна [99, 117, 241]

Удельные тепловыделения биологически активного материала q, Вт/кг, через темп самосогревания $\Delta t/\Delta\tau$ могут быть выражены следующим образом:

$$q = c_{\text{вл.мат}} \cdot (\Delta t / \Delta\tau), \tag{4.42}$$

где $c_{\text{вл.мат}}$ – теплоемкость влажного материала, определяемая по формуле:

$$c_{\text{вл.мат}} = (1 - w_{\text{мат}})c_{\text{сух.в.}} + w_{\text{мат}} c_{\text{воды}}, \tag{4.43}$$

где $c_{\text{сух.в}}$ и $c_{\text{воды}}$ – соответственно, теплоемкость сухих веществ материала и воды, Дж/(кг·°С); $w_{\text{мат}}$ – влажность материала в долях.

Согласно справочным данным, для приближенных расчетов можно принять $c_{\text{сух.в}}$ = 1,55 кДж/(кг·°С) (для зерна), $c_{\text{сух.в}}$ = 1,2…1,7 кДж/(кг·°С) (для травы), $c_{\text{воды}}$ = 4,19 кДж/(кг·°С).

Зависимость $q = f(w_{\text{мат}})$ представлена на рисунках 4.40 и 4.41.

Аппроксимация полученных кривых дала следующий результат:

трава $$q = 383{,}2 w_{\text{тр}}^{4{,}408} \exp(-2{,}925 w_{\text{тр}}); \tag{4.44}$$

зерно $$q = 5{,}7 \cdot 10^{14} w_{\text{з}}^{15{,}93} \exp(-38{,}4 w_{\text{з}}) \cdot \tag{4.45}$$

Для определения удельных тепловыделений при известном значении плотности насыпи травы нами предложена номограмма для определения величины удельных тепловыделений травой различной плотности (рисунок 4.42).

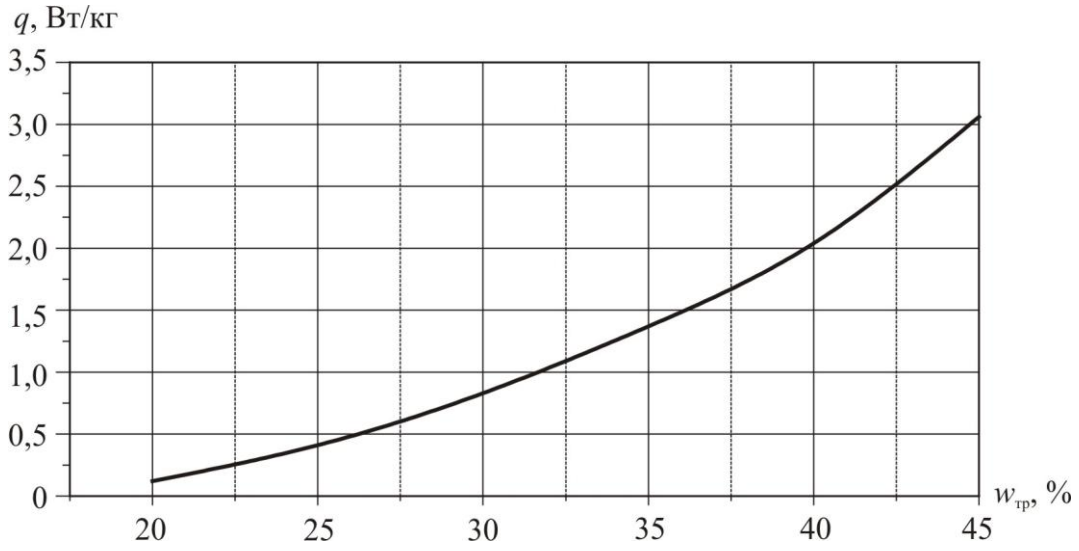


Рисунок 4.40 – Удельные тепловыделения травы

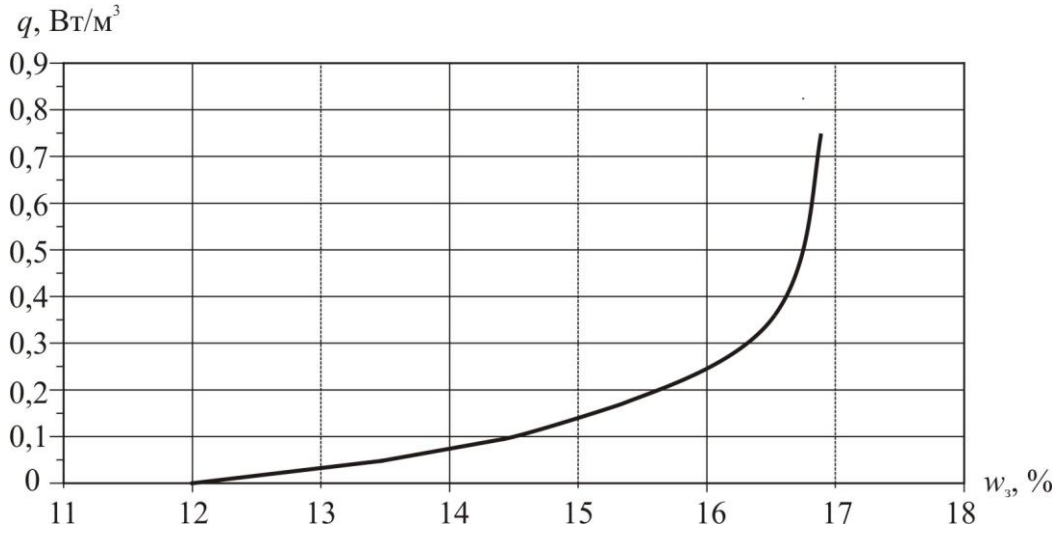


Рисунок 4.41 – Удельные тепловыделения зерна

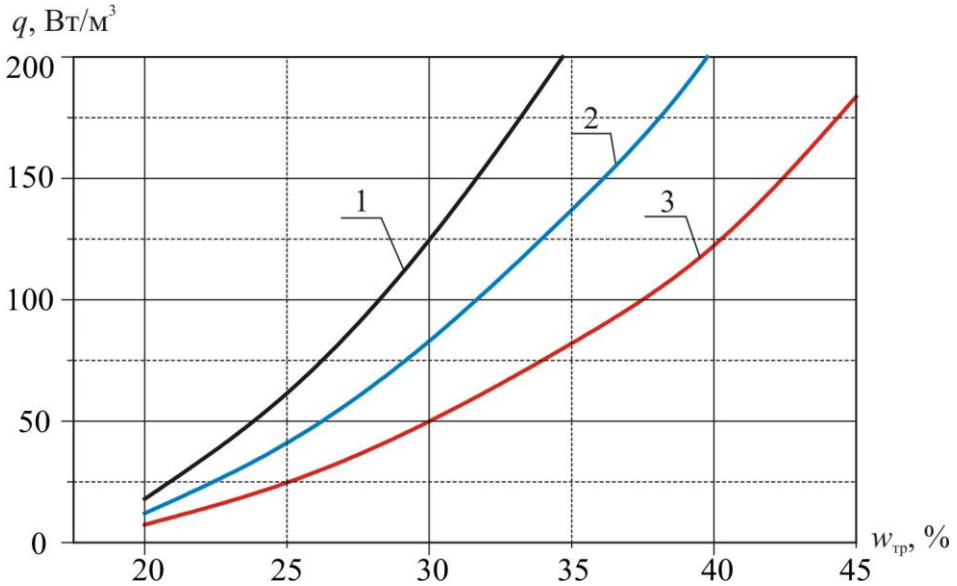


Рисунок 4.42 – Удельные тепловыделения слоя травы плотностью:
1 – 60 кг/м^3; 2 – 100 кг/м^3; 3 – 150 кг/м^3

4.3.2. Исследование эффективности использования солнечных коллекторов

Для определения возможной величины дополнительного подогрева атмосферного воздуха за счет солнечного подогрева и определения эффективности использования данной технологии в практике послеуборочной обработки растительного сырья нами были проведены постановочные эксперименты в реальных условиях. Эксперимент проводился на сенохранилище, оборудованном солнечным коллектором, на территории СПК «Жигули» Самарской области. Реконструкция сенохранилища проводилась по проекту, разработанному доцентом, к.т.н., Е.С.Козловым [139].

Хранилище (рисунок 4.43) представляет собой закрытое помещение с размерами в плане 9х42 м, высотой 4,5 м. Для осуществления активного вентилирования в хранилище смонтированы две системы приточной вентиляции П1 и П2 с центробежными вентиляторами (1) ВЦ 4-70 №10 производительностью $L_в$= 35 000 м^3/ч каждый. Продувка слоя осуществляется через передвижные подстожные каналы (4), соединенные с вентиляторами магистральными воздуховодами (2). Технологический процесс заготовки предусматривает посекционное заполнение всего объема хранилища, начиная с противоположной от вентилятора секции. Заполнение каждой последующей секции осуществляется после того, как влажность высушиваемой в секции травы достигнет кондиционной. Масса травы в каждой секции ≈ 35 т. При такой закладке сырья удельный расход воздуха составляет $L_{уд}$ ≈ 2000 м^3/ч на тонну сена. В период продолжительного хранения производиться периодическое включение нескольких подстожных каналов с регулировкой требуемого расхода шиберами (3).

Система пассивного подогрева воздуха представляет собой армированное прозрачное пленочное покрытие (5), выполненное по деревянному каркасу, перекрывающие объем, в котором размещено оборудование системы П1. В качестве теплоабсорбирующего слоя использован слой котельного шлака толщиной 100 мм. Нагрев воздуха осуществляется за счет теплообмена со стеной хранилища (коэффициент поглощения солнечной радиации β = 0,89), теплоаккумулирующим

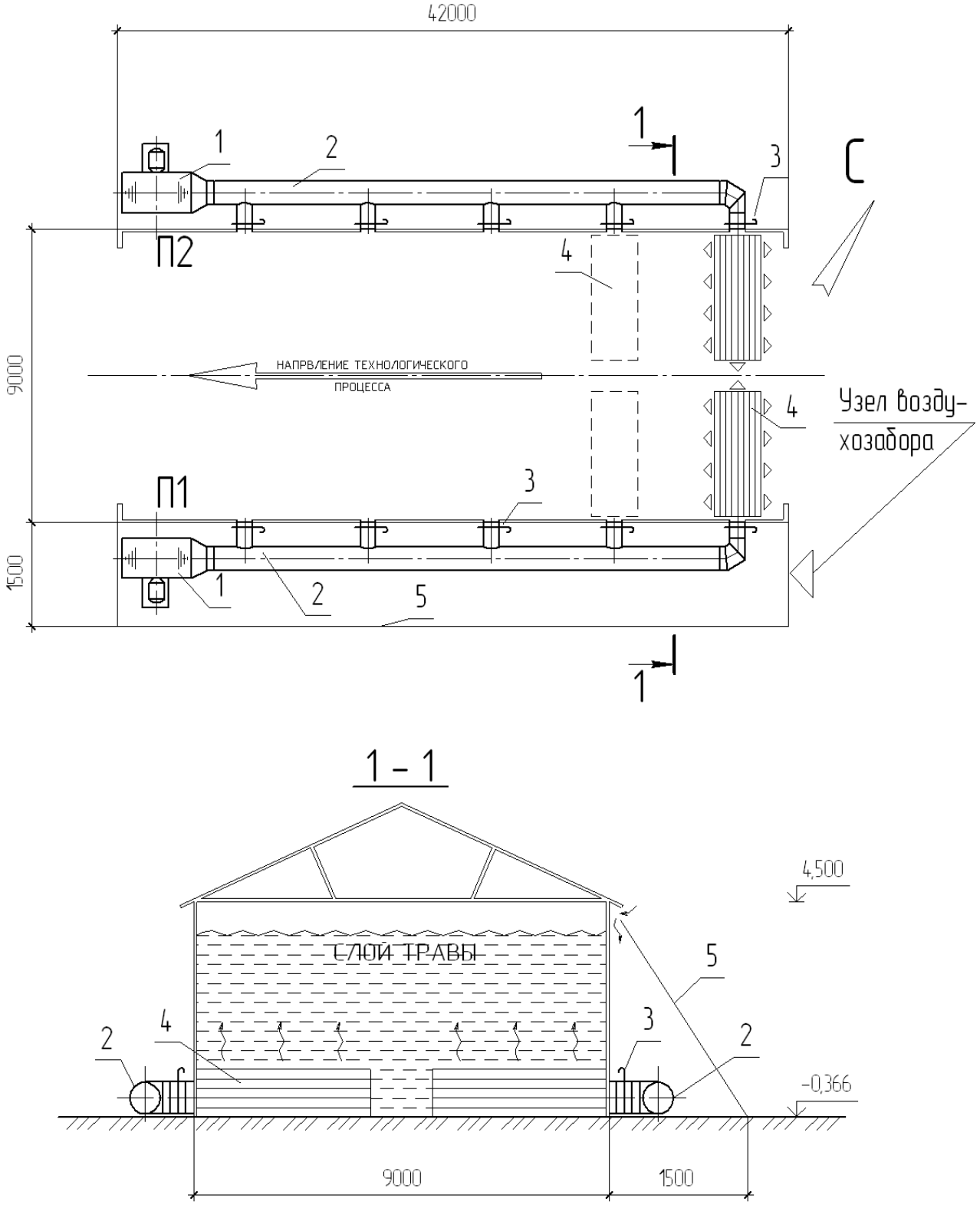


Рисунок 4.43 – Схема сенохранилища с солнечным коллектором

слоем (β = 0,93) и окрашенным в черный цвет металлическим воздуховодом d = 800 мм (β = 0,95).

Измерение параметров атмосферного воздуха ($t_н$, $\varphi_н$) проводилось с северной стороны сенохранилища, приточного воздуха ($t_{во}$, $\varphi_{во}$) – в зоне узла регулиро-

вания и подогретого воздуха ($t_в$) вблизи всасывающего отверстия вентилятора. Измерения осуществлялись с помощью прибора для комплексного измерения параметров климата TESTO 445. Погрешность замера температуры 0,3 °С, относительной влажности 2 %. Испытания проводились летом 2004 г. Полученные результаты приведены в приложении 8.

Минимальная величина перегрева приточного воздуха $\Delta t_{min}=(t_{во} - t_н)$ составила при безоблачном небе 2,9 °С, что привело к снижению относительной влажности на ≈ 10 %. Максимальное значение повышения температуры при безоблачном небе Δt_{max} = 7,3 °С.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о целесообразности использования в данной климатической зоне пассивных гелиосистем для интенсификации процессов сушки активным вентилированием. Правильный выбор рациональной конструктивно-технологической схемы таких устройств позволяет повысить значение коэффициента обеспеченности требуемых параметров сушильного агента до $К_{об}$ = 0,99, что и предполагалось ранее.

4.3.3. Экспериментальные исследования параметров микроклимата при хранении сочного растительного сырья

Определение основного параметра регулирования систем активной вентиляции – времени работы вентиляции в течение суток, с определенными параметрами подаваемого в хранилище воздуха, определение равномерности распределения полей температуры, относительной влажности, потенциалов влажности, биологических тепловлаговыделений возможно только при комплексном учете этих параметров во всем объеме хранилища со среднестатистическими физико-механическими и теплофизическими свойствами хранящейся продукции.

Натурные исследования теплофизических условий хранения СРС при контейнерном хранении СРС проводились в хранилище ООО Агрофирма «Белозерки» Ставропольского района Самарской области. Загрузочные ворота обращены на С и Ю. Хранилище выполнено в виде единого объема с площадью пола 400 м^2 и высотой 6 метров. В здании имеются проемы для загрузки сырья размером 4х3

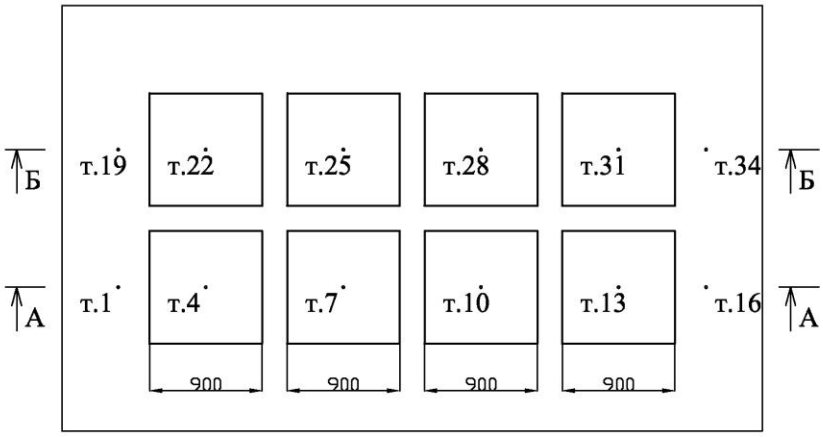
м. Стены выполнены из железобетона. В хранилище имеется общеобменная система вентиляции. Подаваемый в хранилище воздух обрабатывается до оптимальных параметров в приточной камере и подается в хранилище через воздуховоды расположенные в нижней зоне по периметру здания. Воздух удаляется естественным путем через проемы, оборудованные створчатыми клапанами с электроприводами размерами 1х1м., расположенными в верхней части торцов здания. Для оптимизации расходов энергии на подготовку приточного воздуха в зимнее время, имеется возможность частичной рециркуляции воздуха с забором воздуха из верхней части хранилища.

Основные характеристики овощехранилища приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Основные характеристики исследуемого хранилища СРС

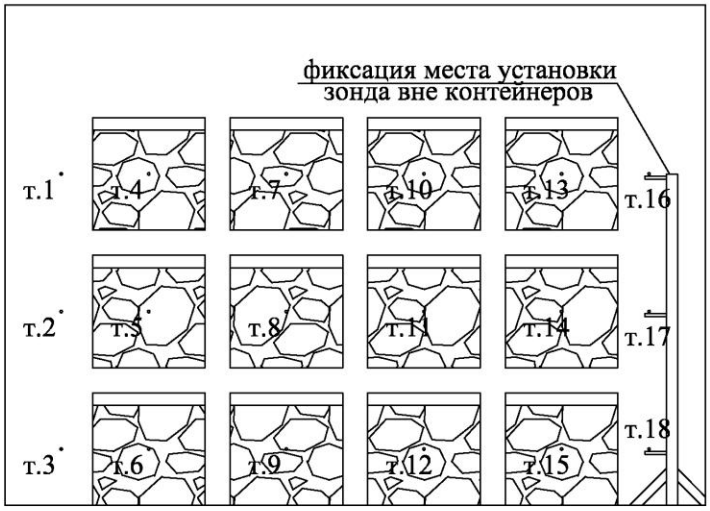
№	Характеристика хранилища	Единица измерения	Значение
1.	Емкость хранилища	т	1280
2.	Этажность	-	одноэтажное
3.	Строительная высота	м	6,6
4.	Строительная площадь	$м^2$	400
5.	Температура внутреннего воздуха	°С	от 0 до 5
6.	Кратность воздухообмена	крат/ч	7

В середине хранилища выбраны два ряда контейнеров в количестве 24 контейнера с картофелем. В характерных зонах выбранных контейнеров и объема хранилища проводились замеры температуры и влажности в точках 1-36 на уровне середины высоты первого, второго и третьего контейнера по высоте и для каждого ряда. В центре каждого контейнера располагалась полая трубка диаметром 30 мм, через которую помещался зонд температуры-влажности прибора testo 435-2. По оси каждого ряда контейнеров на деревянных стойках фиксировалось геометрическое место установки зонда температуры-влажности прибора testo 435-2, таким образом, чтобы высота расположения сенсора зонда совпадала с серединой высоты контейнера в каждом ряду. Всего температура и влажность фиксировалась в 36 точках. На рисунке 4.44 показан план и разрез по первому и второму ряду контейнеров с указанием точек замера.



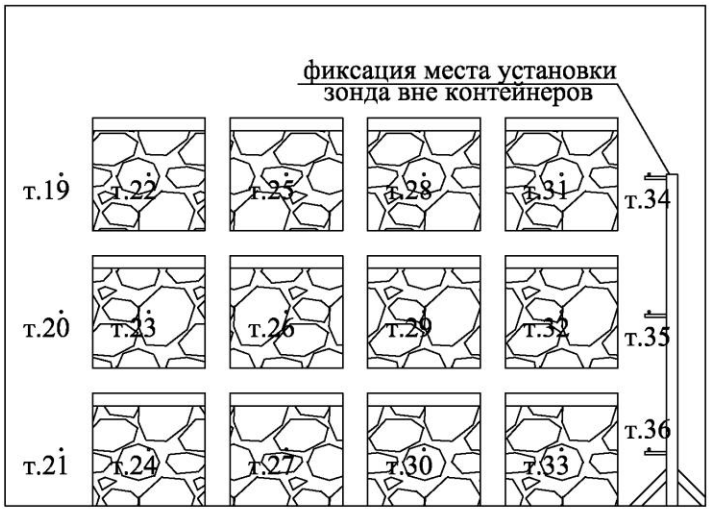
а

Разрез А-А (первый ряд)



б

Разрез Б-Б (второй ряд)



в

Рисунок 4.44 – Отсек для проведения натурного эксперимента с указанием точек замеров находящихся вне контейнеров: а – план, б – разрез

Случайная ошибка для многофункционального измерительного прибора testo 435-2 при измерении температуры составляет $\Delta_{сл}$ = ± 0,14 ºС, при измерении относительной влажности - $\Delta_{сл}$ = ± 0,34 %. Расчет минимального количества измерений произведен с учетом следующих заданных параметров: доверительная вероятность α = 0,95; доверительный интервал β_0=0,2; 0,5; для измерения температуры и относительной влажности соответственно и составляет *n* = 5. Экспериментально полученные значения температуры, относительной влажности и потенциала влажности в точках замера представлены в приложении 9.

Для построения наглядных рисунков в двухмерной плоскости полей температуры, относительной влажности и потенциала влажности в хранилище, значения замеров усреднены по принципу т. 1 – т. 19, т. 2 – т. 20 … т. 17 – т. 35, т. 18 – т. 36. На основании осредненных данных по каждому дню проведения замеров с применением программно-вычислительного комплекса Origin 8.1 построены поля температуры, относительной влажности (приложение 10) и потенциала влажности (рисунок 4.45) в камере хранения, которые наглядно характеризуют параметры микроклимата в хранилище на протяжении всего периода проведения эксперимента.

Натурные исследования показали соответствие теплофизических условий хранения в контейнерах с СРС рекомендуемым в технической и нормативной литературе. Общий анализ полей температур и относительной влажности и потенциалов влажности на протяжении всего периода проведения натурных исследований показал неравномерность распределения исследуемых параметров в объеме хранилища, что вызвано различными температурно-влажностными условиями наружного климата и неспособностью приточной установки быстро реагировать на меняющиеся параметры наружного воздуха.

Установлено, что в исследуемом объеме наблюдается неравномерность полей температур и относительной влажности и потенциалов влажности. Значения температур, относительной влажности и потенциала влажности меняются в диапазонах 3,6 – 5,3 °С, 77,0 – 92,5 %, 14,0 – 21,9 °В, соответственно.

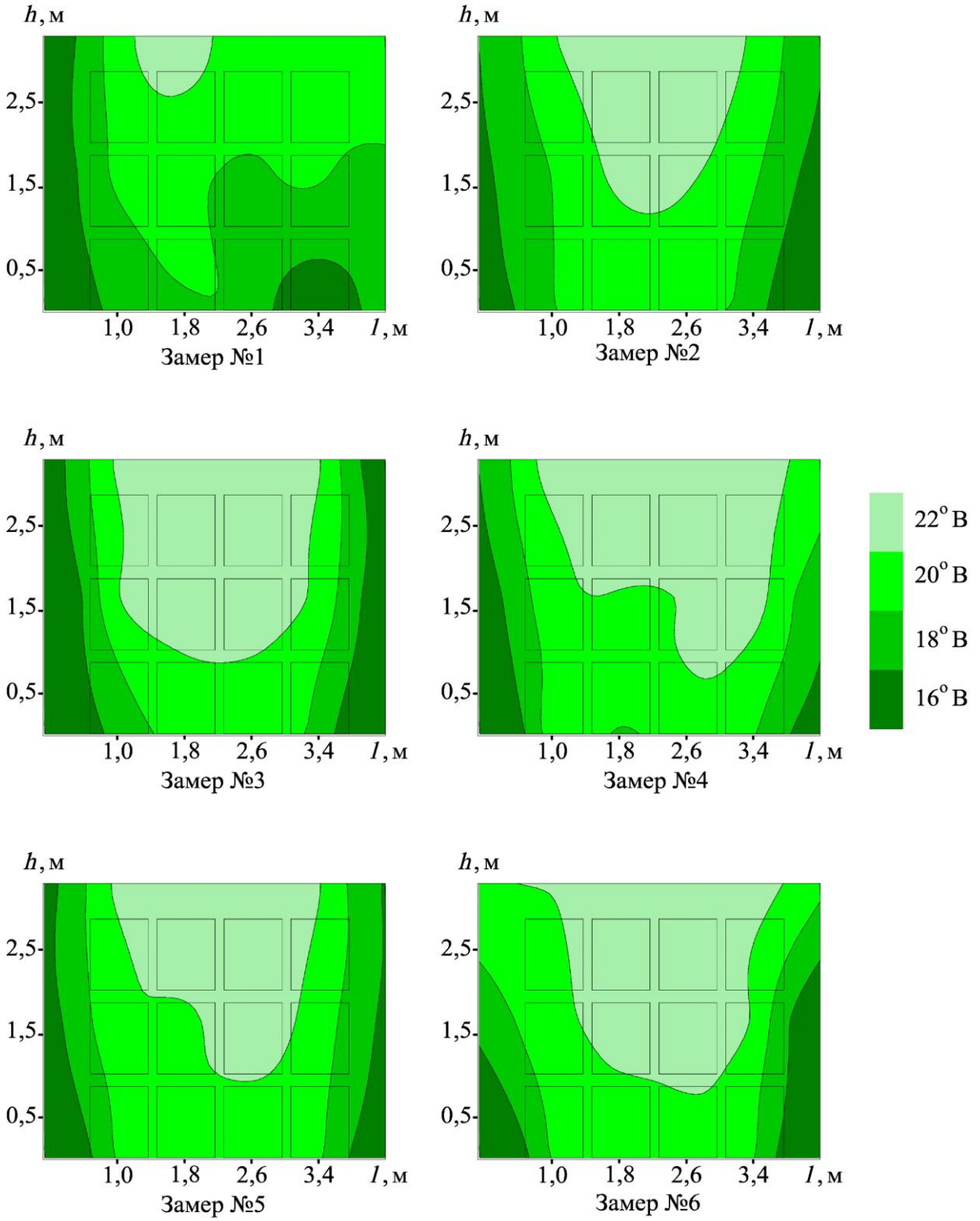


Рисунок 4.45 – Поля потенциала влажности в хранилище

Анализ исследования полей температур в штабеле и объеме камеры показал, что температура воздуха в контейнерном и свободном пространстве камеры отличается от температуры сырья в контейнере. Температура в насыпи сырья в контейнерах выше, чем в свободном пространстве, разница значений достигает

1,7 °С, и зависит от геометрического расположения контейнеров в хранилище [157, 164].

Максимальная разница наблюдается в верхнем ряду, что вызвано наличием постоянных тепло выделений хранящейся продукции в процессе дыхания.

Относительная влажность характеризуется неравномерными полями в объеме хранилища. Значения относительной влажности φ меняются в диапазоне от 77,0 до 92,5 %. Подаваемый в хранилище воздух, фильтруясь в межконтейнерном пространстве и через контейнеры с сырьем, ассимилирует влагу хранящейся продукции, выделяемую в процессе дыхания. Наблюдается увеличение значений относительной влажности по направлению вверх. Максимальные значения относительной влажности зафиксированы в верхней зоне исследуемого объема. Также можно отметить, что повышенная влажность, значения которой выше рекомендованной для хранения соответствующего вида СРС, может вызвать появление капельной влаги.

Следует отметить, что результаты натурных исследований по распределению температуры и относительной влажности имеют высокую сходимость с результатами экспериментальных исследований, проводимых ранее М.П. Калашниковым [121, 122].

Поля потенциалов влажности, напротив имеют выраженный равномерный характер в исследуемом объеме, что свидетельствует о правомерности применения понятия потенциал влажности и I–d–θ-диаграммы в расчете времени работы систем вентиляции. Значения потенциалов влажности θ в общем объеме хранилища изменяются в диапазоне от 14,0 до 21,9 °В в зависимости от геометрического расположения контейнеров. Наблюдается равномерный градиент возрастания потенциала влажности по высоте. Равномерность или линейность в возрастании потенциала влажности по высоте обусловлена тем что, значение потенциал влажности одновременно зависит от температуры и относительной влажности. Потенциал влажности характеризует общую картину дефицита или избытка ассимилирующей способности подаваемого в хранилище воздуха. В расчетах времени работы систем вентиляции, и для оперативного регулирования тепловлажностной

характеристики подаваемого в хранилище воздуха можно применять осредненные значения потенциала влажности, как показатель общей картины тепловлагообменных процессов в хранилище, что упростит расчеты и с достаточной точностью позволит оперативно вносить корректировку в тепловлажностную характеристику подаваемого в хранилище воздуха.

Характер полученных полей потенциала влажности позволяет рассматривать штабель контейнеров сочного растительного сырья как насыпь с равномерно распределенными по объему источниками теплоты и влаги.

Изменение значений потенциала влажности по высоте хранящейся продукции представлено в виде графика (рисунок 4.46), построенного на основании экспериментально полученных полей потенциала влажности в хранилище. В качестве расчетных точек приняты осредненные значения потенциала влажности в исследуемом объеме хранилища с шагом 0,5 м.

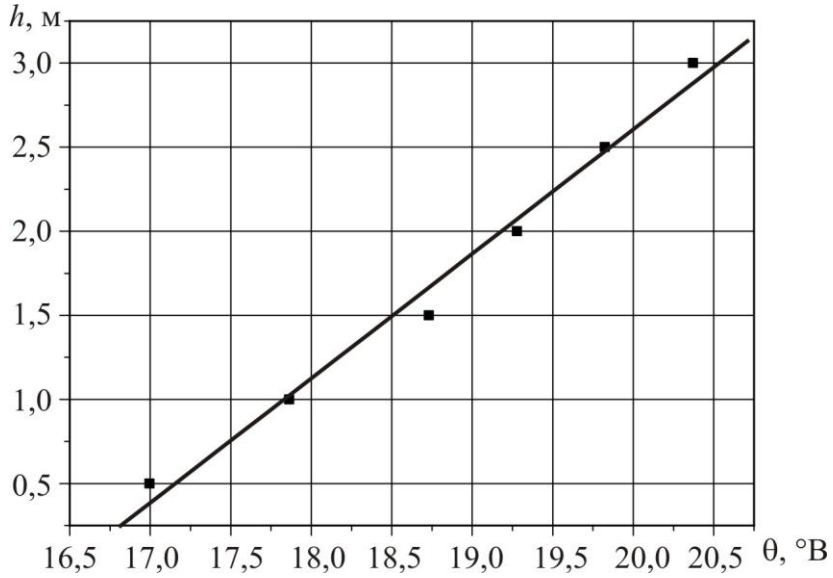


Рисунок 4.46 – Динамика изменения потенциала влажности в зависимости от высоты слоя хранящейся продукции

В качестве аппроксимирующей функции, наиболее вероятно показывающей расчетные точки, выбрана линейная зависимость, описываемая уравнением:

$$\theta = \frac{h + 12{,}19}{0{,}74}, \qquad (4.46)$$

где h – высота слоя хранящейся продукции, м.

Зависимость (4.46) однозначно характеризует динамику потенциала влажности в слое хранящейся продукции в зависимости от высоты слоя и позволяет упростить расчеты при определении оптимальных условий хранения сочного растительного сырья [164].

4.4. Инженерные методы расчета режимов работы систем вентиляции

4.4.1. Инженерная методика расчета тепломассопереноса в процессе сушки на основе градиента потенциала влажности

Полученные в результате графоаналитических исследований математические зависимости для определения значений потенциала влажности воздуха θ, позволяют упростить инженерную методику расчета процесса сушки биологически активного сырья [38].

Влагопоток W, г, от высушиваемого материала массой $G_{мат}$, т, к сушильному агенту будет равен (луч 1–3, рисунок 4.27):

$$W = \alpha_{\theta}(\theta_3 - \theta_1)G_{мат} \qquad (4.47)$$

где θ_1, θ_3 – потенциалы, соответственно, влажности воздуха в начале и конце процесса сушки, °В.

Величина потенциала влажности θ на входе в корректирующий слой определяется параметрами атмосферного воздуха и рассчитывается по (4.11), (4.14) и (4.15).

Потенциал влажности воздуха в близи поверхности сохнущей растительной массы $\theta_{пов}$ зависит от влажности массы и, соответственно от ее относительной влажности: при $w_{тр} < w_г$, $\varphi_{пов} = \varphi_р$, при $w_{тр} > w_г$, $\varphi_{пов} \approx 100\%$.

Значения локальных температур поверхности сырья в корректирующем слое в первом приближении определяется из уравнения (рисунок 4.3):

$$t_к = t_G + \frac{t_A - t_G + \Delta t_{во}}{x_к} x. \qquad (4.48)$$

На выходе из корректирующего слоя (I, рисунок 4.2) потенциал влажности воздуха определяется его параметрами в точке В (рисунок 4.3). Дополнительный подогрев за счет теплоты самосогревания $\Delta t_{во}$ рассчитывается по балансовому

уравнению (4.1). Потенциал $\theta_в$ зависит от гигроскопических свойств материала, описанных изотермами сорбции-десорбции, и может быть определен графически или рассчитан по предложенным зависимостям (4.11),(4.14) и (4.15).

В основном слое (II, рисунок 4.2) разность потенциалов влажности поверхности сырья и воздуха $\Delta\theta_в$ определяется только разностью температур поверхности сохнущего сырья и воздуха Δt ввиду постоянного значения относительной влажности воздуха ($\varphi = \varphi_р = \text{const}$).

Коэффициент α_θ по своему физическому смыслу является показателем интенсивности процесса влагопереноса. Графическая зависимость $\alpha_\theta = f(t)$ для травы, построенная на основе экспериментальных данных [31], приведена на рисунке 4.47. Для аналитического определения коэффициента массопереноса α_θ, с достаточной для инженерных расчетов степенью точности, следует использовать следующие выражения:

$$\begin{aligned} &\text{при } t < 20\ °\text{C} && \alpha_\theta = 8{,}15t + 363\,, \\ &\text{при } 20\ °\text{C} < t < 25\ °\text{C} && \alpha_\theta = 10{,}4t + 317 \\ &\text{при } 25\ °\text{C} < t < 30\ °\text{C} && \alpha_\theta = 23{,}8t - 27 \end{aligned} \qquad (4.49)$$

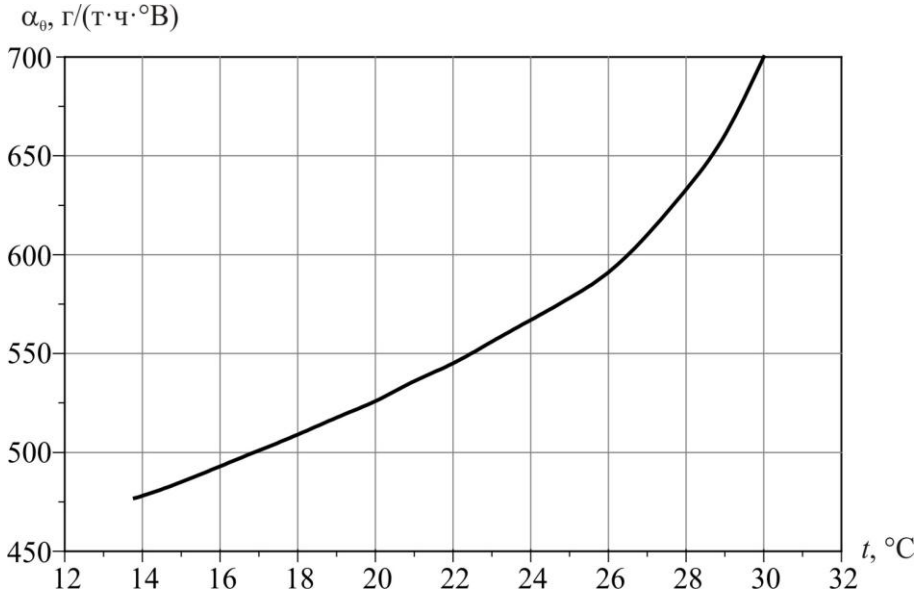


Рисунок 4.47 – Значения коэффициента α_θ в слое сохнущей травы

В тоже время количество влаги, поглощаемое воздухом, равно:

$$W = G_в(d_к - d_н)\,, \qquad (4.50)$$

где $G_в$ – расход продувочного воздуха, кг/ч, определяемый как

$$G_{в} = g_{в} G_{мат},$$

где $g_{в}$ – удельный расход воздуха, кг/(ч·т).

Из условия равенства выражений (4.47) и (4.50) получаем:

$$\alpha_{\theta} = \frac{g_{в}(d_{к} - d_{н})}{\theta_{к} - \theta_{н}}. \qquad (4.51)$$

где $d_{н}$, $d_{к}$ – влагосодержание воздуха, соответственно, в начале и конце процесса сушки, г/кг сух. в-ха.

Предложенная методика расчета с использование *I–d–*θ-диаграммы позволяет графически либо аналитически определить величину потенциала влажности воздуха и количество влаги, удаляемое из материала в процессе сушки, найти численные значения коэффициента влагопереноса α_{θ} для различных типов материалов, а также наглядно оценить возможность и пределы протекания процессов влагообмена в слое растительного сырья.

4.4.2. Примеры расчета процесса сушки с помощью *I–d–*θ-диаграммы

Рассмотрим конкретный пример расчета режимов работы САВ, используя результаты аналитических и натурных исследований, представленных выше [35, 38,165].

Пример 1. Начальные параметры подлежащей сушке травы (тимофеевка), уложенной в скирду массой $G_{тр}$ = 50 т, равны $w_{тр}$ = 40 %, $t_{к}$ = 15 °С. Соответствующая равновесная относительная влажность воздуха $\varphi_{р}$ = 93 %. Параметры атмосферного воздуха в точке 1 (рисунок 4.48): $t_{во}$ = 18 °С, $\varphi_{во}$ = 50 % ($К_{об}$ = 0,95). Заштрихованная область на рисунке 4.48 ограничивает значения параметров наружного воздуха с коэффициентом обеспеченности $К_{об}$ = 0,9. По *I–d–*θ-диаграмме влажного воздуха определим d_{1} = $d_{во}$= 6,4 г/кг сух. в-ха, I_{1} = $I_{во}$ = 34,5 кДж/кг, θ_{1} = $\theta_{во}$ = 16° В. Система активной вентиляции оборудована вентагрегатом производительностью $L_{в}$ = 70000 м^{3}/ч. Мощность, потребляемая вентилятором $N_{в}$ = 22,0 кВт. Если бы объект сушки не обладал биологической активностью, то процесс сушки такого материала был бы адиабатным и изображался на *I–d–*θ-диаграмме лучом

1–2. Параметры воздуха в точке 2: t_2 = 13 °С, d_2 = 8,6 г/кг сух.в-ха, $\varphi_2 = \varphi_р$ = 93 %.

Потенциал влажности в точке 2 находится по зависимости (4.14):

$$\lg \theta_2 = 0{,}12 \cdot 8{,}6 - 0{,}049 \cdot 13 + 1{,}056 = 1{,}451;\ \theta_2 = 10^{1{,}451} = 28{,}4\ °В$$

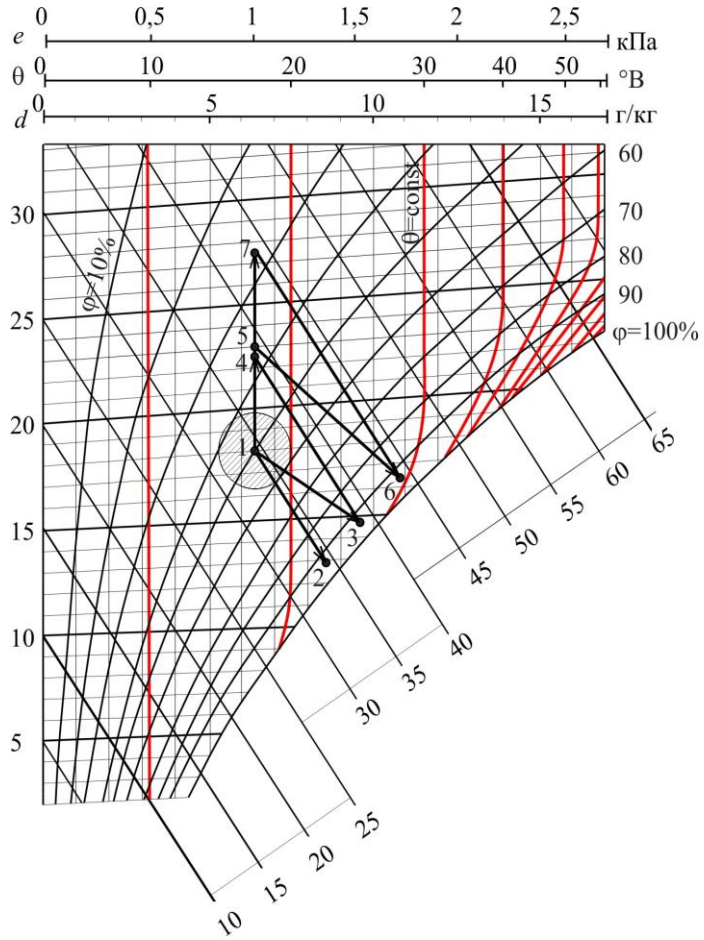


Рисунок 4.48 – К расчету интенсивности и времени сушки травы

Данное значение и значение потенциала влажности в точке 2 θ_2 = 25,5 °В, определенное графически по *I*–*d*–θ-диаграмме, лежат в пределах погрешности ±10 %.

Ассимилирующая способность воздуха $\Delta d_а = d_2 - d_1$ = 8,6 – 6,4 = 2,2 г/кг сух.в-ха. Градиент влагопереноса $\Delta\theta_а = \theta_2 - \theta_1$ = 25,5 – 16 = 9,5 °В.

Средняя удельная величина биологических тепловыделений определяется по (4.44): $q_v = 383{,}2 \cdot 0{,}4^{4{,}408} \exp(-2{,}925 \cdot 0{,}4) = 2{,}09$ Вт/кг. Суммарные тепловыделения скирдой составляют: $Q_б = G_{тр} q_v = 50 \cdot 10^3 \cdot 2{,}09 = 104{,}5$ Вт, что соответствует повышению температуры продувочного воздуха на

$$\Delta t_в = \frac{Q_б}{L_в \rho_в c_в} = \frac{3{,}6 \cdot 104{,}5 \cdot 10^3}{70 \cdot 10^3 \cdot 1{,}2 \cdot 1} = 4{,}5°С.$$

Процесс сушки биологически активного сырья будет идти до точки 3, параметры воздуха в которой равны: t_3 = 15 °С, d_3 = 9,7 г/кг сух.в-ха, θ_3 = 27,4 °В, φ_3 = $\varphi_р$ = 93 %. Сорбционная способность воздуха увеличивается до $\Delta d_к = d_3 - d_1$ = 9,7 – 6,4 = 3,3 г/кг сух.в-ха. Разность потенциалов влажности $\Delta\theta_к = \theta_3 - \theta_1$ = 27,4 – 16 = 11,4 °В.

Коэффициент массообмена (4.49): α_θ = 8,15·15+363 = 485 г/ т·ч·°В.

Количество удаляемой влаги (4.47): W= 485·11,4·50= 276,5 кг вл/ч.

Минимальный расход воздуха, необходимый для ассимиляции такого количества влаги из травы будет равен: $L_в = \dfrac{W}{\rho_в(d_3 - d_1)} = \dfrac{276{,}5}{1{,}2(9{,}7 - 6{,}4)} = 69{,}8 \cdot 10^3$ м^3/ч,

т.е. система активной вентиляции должна быть оборудована вентагрегатом производительностью $L_в \geq 70\,000$ м^3/ч.

Переход процесса сушки в гигроскопическую область осуществляется при достижении травой влажности $w_{тр} = w_г \approx 31$ % (кондиционная влажность готовой продукции $w_к$ = 19 %).

Масса удаляемой из травы влаги при изменении ее влажности от $w_{тр}$ до $w_г$ находится по зависимости: $G_{вл}^{г} = \dfrac{G_{тр}(w_{тр} - w_г)}{(100 - w_г)} = \dfrac{50(40 - 31)}{(100 - 31)} = 6{,}52$ т. Масса влаги, удаляемой из травы в процессе досушки до кондиционной влажности $w_к$ определяется как: $G_{вл}^{к} = \dfrac{(G_{тр} - G_{вл}^{г})(w_{тр} - w_г)}{(100 - w_г)} = \dfrac{(50 - 6{,}52)(31 - 19)}{(100 - 19)} = 6{,}44$ т.

Минимальное время сушки травы до кондиционной влажности с учетом снижения скорости ассимиляции влаги в период падающей скорости сушки равно: $\tau = \dfrac{10^3 G_{вл}^{г}}{W} + \dfrac{2 \cdot 10^3 G_{вл}^{к}}{W} = \dfrac{10^3 \cdot 6{,}52}{276{,}5} + \dfrac{2 \cdot 10^3 \cdot 6{,}44}{276{,}5} = 23{,}6 + 46{,}6 = 70{,}2$ ч.

Анализ опытных данных по практическому использованию гелиоколлекторов и результаты проведенных натурных исследований показали, что минимальная величина предварительного подогрева наружного воздуха в солнечном коллекторе составляет $\Delta t_{сол}$ = 5 °С. Ассимилирующая способность воздуха в этом случае возрастает до $\Delta d_{кг} = d_6 - d_5$ = 10,9–6,4 = 4,5 г/кг сух. в-ха. Разность потен-

циалов влажности $\Delta\theta_{кг} = \theta_6 - \theta_5 = 29 - 16 = 13$ °В. Следует отметить, что дополнительный подогрев атмосферного воздуха в системах солнечного подогрева не изменяет значений потенциала влажности θ наружного воздуха, но увеличивает движущую силу тепломассопереноса Δθ внутри слоя.

Интенсивность влагоудаления: $W = 485 \cdot 13 \cdot 50 = 315{,}3$ кг/ч.

Продолжительность процесса сушки:

$$\tau' = \frac{10^3 \cdot 6{,}52}{315{,}3} + \frac{2 \cdot 10^3 \cdot 6{,}44}{315{,}3} = 20{,}7 + 40{,}8 = 61{,}5\,\text{ч}.$$

Таким образом, использование солнечного подогрева позволяет уменьшить расход воздуха, продуваемого через слой или сократить время сушки на $\Delta\tau = \tau - \tau' = 46{,}9 - 41 = 8{,}7$ ч. При ежесуточной 10-ти часовой продувке продолжительность сушки травы неподогретым воздухом составляет 7 суток, а при использовании солнечного подогрева 6 суток.

Пример 2. Примем начальные параметры сушильного агента: $t_{во} = 24$ °С, $\varphi_{во} = 35$ %, $d_{во} = 6{,}5$ г/кг сух.в-ха, $\theta_{во} = 16$ °В. Параметры воздуха на выходе из слоя: $t_3 = 18$ °С, $\varphi_3 = 90$ %, $d_3 = 11{,}5$ г/кг сух. в-ха, $\theta_3 = 30$ °В. Удельный расход воздуха $g_в = 1800$ кг/(ч·т) (рисунок 4.49).

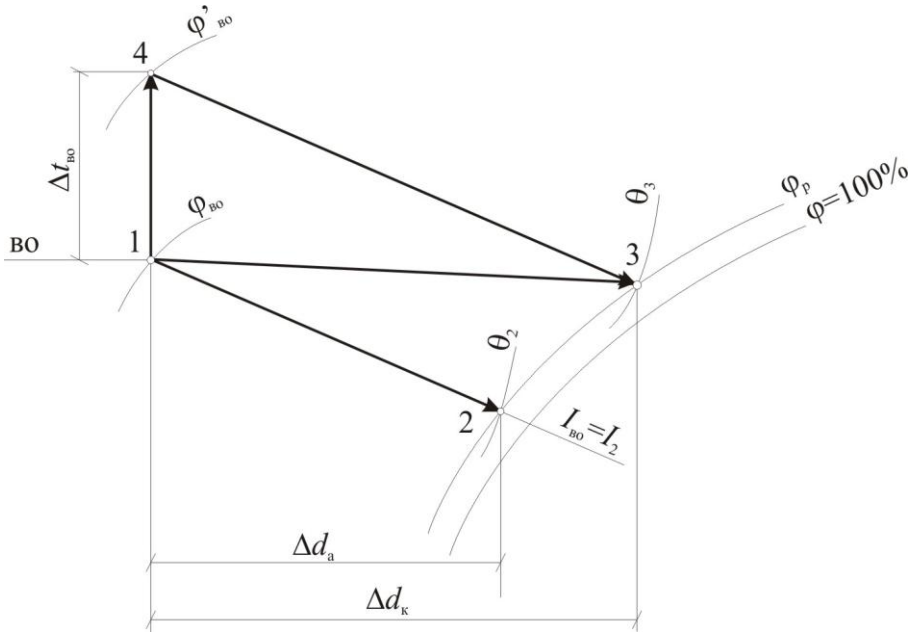


Рисунок 4.49 – К расчету коэффициента влагопереноса α_θ

Коэффициент массопереноса будет равен:

$$\alpha_\theta = \frac{1800(11{,}5 - 6{,}5)}{30 - 16} = 643\,\text{г/т·ч·°В}.$$

4.4.3. Инженерная методика расчета режимов работы систем обеспечения микроклимата при хранении биологически активного сырья

Приведенные в разделе 1.1.2 зависимости (1.27…1.31) позволяют определить время работы САВ для снятия теплоизбытков. Полученные в результате графо-аналитических исследований математические зависимости для определения значений потенциала влажности воздуха θ и уточнение нанесения линий постоянных потенциалов влажности на *I*–*d*–θ-диаграмме в области низких температур позволяют упростить инженерную методику расчета потерь СРС в процессе хранения и уточнить режимы работы систем активной вентиляции в отношении влажностного режима [160, 164].

Согласно теории потенциала влажности, влагопоток *W*, г/ч, от насыпи СРС массой $G_{мат}$, т, к продувочному воздуху (процесс *A*–*C*, рисунок 4.50) определяется по формуле (4.47).

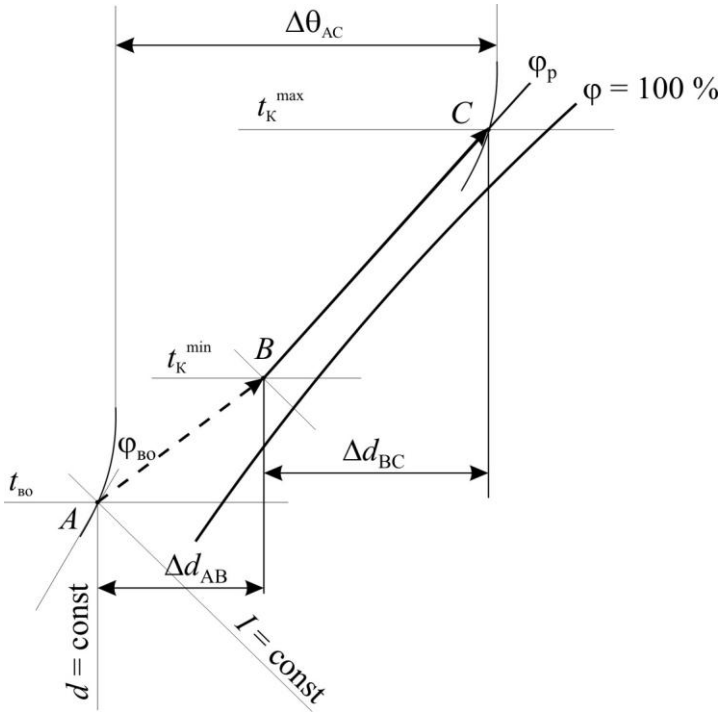


Рисунок 4.50 – Изменение состояния продуваемого воздуха в насыпи сочного растительного сырья

Потенциал влажности θ_A на входе в слой сырья находится по параметрам подаваемого воздуха и может быть определен графически по I–d–θ-диаграмме.

Изменение тепловлажностной характеристики продуваемого воздуха на I–d–θ-диаграмме показано на рисунке 4.50. Воздух, поступая в хранилище, увлажняется до равновесной влажности $\varphi_р$ и одновременно нагревается до температуры нижней части основного слоя. Потенциал влажности воздуха на поверхности хранящейся растительной массы $\theta_{пов}$ зависит от выделяемой в хранилищах влаги от дыхания. Воздух удаляется из насыпи с параметрами точки C (t_C, φ_C, θ_C, d_C).

Значения относительной влажности в насыпи в течение периода хранения носят постоянный характер $\varphi = \varphi_р = const$, в результате разность потенциалов влажности продукции и продуваемого воздуха $\Delta\theta_{AC}$ характеризуется только разностью температур продукции и продуваемого воздуха Δt.

Количество влаги, ассимилируемое продуваемым воздухом, рассчитывается по формуле (4.50). Аналогично процессам сушки коэффициент влагопереноса α_θ определяется по (4.51).

Используя уточненную I–d–θ-диаграмму и полученные ранее экспериментальные данные, представленные в научной литературе [121], получена графическая зависимость коэффициента массопереноса α_θ от температуры и удельного расхода воздуха (рисунок 4.51) [164].

В результате аппроксимации графиков получены следующие зависимости:

$$\begin{aligned} &\text{при } 10 < g_в < 20 && \alpha_\theta = 0{,}25 \cdot \Delta t + 2{,}94\,; \\ &\text{при } 20 < g_в < 30 && \alpha_\theta = 0{,}42 \cdot \Delta t + 4{,}9\,; \\ &\text{при } 30 < g_в < 40 && \alpha_\theta = 0{,}59 \cdot \Delta t + 6{,}86\,, \end{aligned} \qquad (4.52)$$

где Δt – температурный перепад уходящего и подаваемого воздуха, °С;

$g_в$ – удельный расход воздуха, кг/(ч·т).

Предложенный метод определения коэффициента влагопереноса α_θ позволяет производить расчет процесса влагообмена в системе «поверхность биологи чески активной продукции – продуваемый воздух» аналитически и графически с

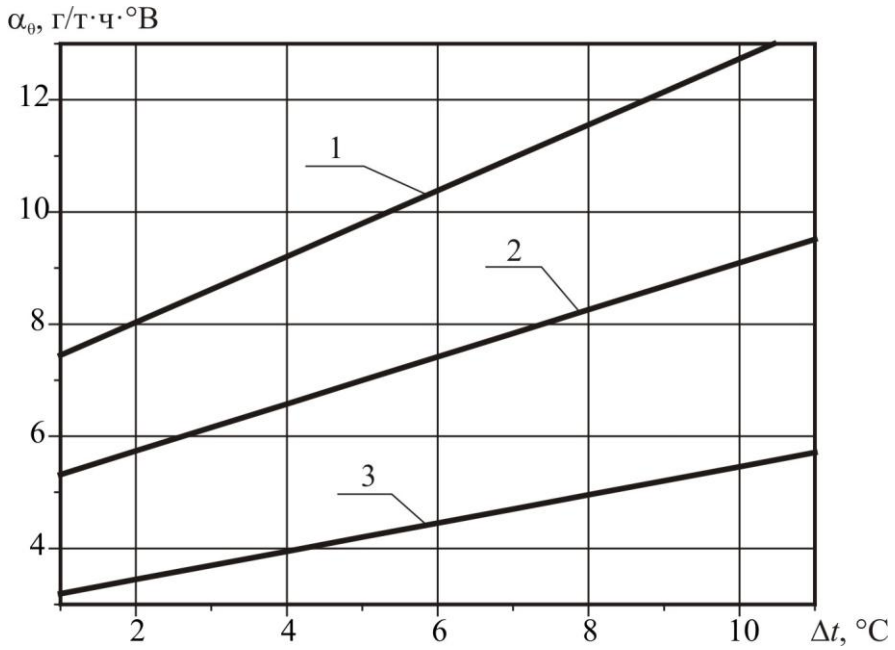


Рисунок 4.51 – Значения коэффициента α_θ в слое СРС в зависимости от удельного расхода продувочного воздуха: 1 – при $30 < g_в < 40$; 2 – при $20 < g_в < 30$; 3 – при $10 < g_в < 20$.

применением I–d–θ-диаграммы, и позволяет определять количество влаги ассимилируемой продуваемым воздухом.

Для обеспечения высокой сохранности продукции нахождение цикличности работы систем обеспечения микроклимата в течение суток должно быть связано с вопросами обеспечения влажностного режима насыпи. В процессе хранения пониженная влажность подаваемого воздуха увеличивает естественную убыль. Повышение влажности продувочного воздуха ведет к недостаточной ассимиляции влаги в период работы систем вентиляции, приводит к накоплению влаги в продукции, способствует развитию фитопатогенных организмов, гниению, что приводит к дополнительным потерям при хранении.

Влага, постоянно накапливающаяся при хранении, должна быть ассимилирована во время работы вентиляции. В течение суток должно выполняться равенство:

$$W_н = W_в . \qquad (4.53)$$

В тоже время при работе систем вентиляции из слоя сочного растительного сырья, согласно теории потенциала влажности, продуваемый воздух ассимилирует влагу, г, в количестве:

$$W_{в} = \alpha_{\theta}(\theta_{у} - \theta_{в.о.})G_{мат}\tau_{в}, \qquad (4.54)$$

где $\theta_{в.о}$ – начальный потенциал влажности подаваемого воздуха, °В; $\theta_{у}$ – потенциал влажности удаляемого из хранилища воздуха, °В; $\tau_{в}$ – время работы систем обеспечения микроклимата, ч.

Соблюдения равенства (4.53) при меняющихся значениях температуры и потенциала влажности продуваемого воздуха, тепло- и влаговыделений продукции, обеспечивает максимальную сохранность сырья, т.е. снижение потерь при хранении до биологически неизбежных.

Для достижения условий максимальной сохранности продукции при хранении, т.е выполнение равенства (4.53), необходимо чтобы система обеспечения параметров микроклимата работала определенное время в течении суток [160, 164]:

$$K^{\theta}_{в.вл} = \frac{W_{н}}{\alpha_{\theta}(\theta_{у} - \theta_{во})G_{мат}}, \qquad (4.55)$$

где $K^{\theta}_{в.вл}$ – коэффициент использования вентиляции, определяющий среднее время работы систем активной вентиляции в сутки в зависимости от влажностного режима насыпи.

Инженерная методика расчета времени работы системы вентиляции хранилища сочного растительного сырья на основе понятия потенциал влажности следующая.

1. По уточненной *I*–*d*–θ-диаграмме (рисунок 4.26) или по аналитическим зависимостям (4.28…4.31, 4.46) находим значения потенциалов влажности $\theta_{у}$ и $\theta_{во.}$ удаляемого и подаваемого в хранилище воздуха.

2. По величине удельного расхода подаваемого в хранилище воздуха $g_{в}$ и температурного перепада уходящего и подаваемого воздуха $\Delta t = t_{ух} - t_{во}$ находим коэффициент влагопереноса α_{θ} (зависимости 4.52).

3. Определяем количество влаги, выделяемой продукцией *W*, г/ч.

4. По зависимости (4.55) рассчитываем коэффициент использования вентиляции $K^{\theta}_{в.вл}$.

5. На основании полученного коэффициента использования вентиляции производим корректировку времени работы системы вентиляции.

Ниже рассмотрен конкретный пример расчета режимов работы систем обеспечения параметров микроклимата с использованием результатов аналитических и натурных исследований.

Пример 3. Картофелехранилище емкостью $G_р$ = 1000 т, высота загрузки клубней 3 м., расход воздуха L_v = 60 м^3/(м^3·ч).

В период охлаждения начальная разность температур насыпи и охлаждающего воздуха Δt_0 = 14 °С; скорость охлаждения клубней $\Delta z_{опт}$ = 0,04 °С/ч; интенсивность явных тепловыделений $q_{СРС}$ =100 кДж/(м^{3}ч). Определим параметр охлаждения $\eta_{эф} = 10^4 \cdot \frac{0{,}04}{100} = 4$ и приведенный расход воздуха $L_{эф} = \frac{60 \cdot 14}{100} = 8{,}4$ м^3/ч.

Диапазон оптимальных расходов воздуха определяется условием (1.28):

$$L_v \geq \frac{1}{14}(3{,}8 \cdot 100 + 1{,}1 \cdot 10^4 \cdot 0{,}04) = 58 \text{ м}^3/(\text{м}^3 \cdot \text{ч}).$$

Проверим ограничение верхнего предела L_v выражением $L_{v\ опт} < 717/h$ = 717/3 = 239 м^3/(м^3·ч). Расход воздуха находится в допустимых пределах.

Коэффициент использования вентиляции $К_в = 2\ \frac{1+0{,}25 \cdot 4}{1+1{,}5 \cdot 8{,}4} = 0{,}3$, т. е. САВ должна работать 0,3·24 = 8 ч в сутки.

В основной период хранения Δt_0 = 2…2,5 °С; средняя температура воздуха в хранилище $t'_{хр}$ = 1 °С; $q_{СРС}$ = 43,5 кДж/(м^{3}ч). Расчетная величина $К'_в$ за период в связи с отличием значения $t'_{хр}$ от оптимального, равного $t'_{хр}$ = 1,5 °С, имеет значение $К'_в = \frac{0{,}8 \cdot 43{,}5}{(4-1)60} - \frac{3{,}4(2-0{,}5 \cdot 1)}{60 \cdot 3} = 0{,}16$, то есть время работы САВ составляет 0,16·24 ≈ 3 ч 50 мин. в сутки.

При хранении температура уходящего воздуха достигала 3 °С ($t_{ух}$ = 3 °С), с $\varphi_р$ = 95 %, приточный воздух подаваемый в насыпь был подготовлен в приточно-смесительной камере со следующими параметрами: $t_{во}$ = 1 °С, $\varphi_{во}$ = 80 %. По уточненной *I*–*d*–θ-диаграмме (рисунок 4.26) $\theta_у = 22\ ^\circ В$, $\theta_{во} = 14\ ^\circ В$.

Определим коэффициент массопереноса по зависимости (4.52):

$$\alpha_{\theta} = 0{,}59 \cdot \Delta t + 6{,}86 = 0{,}59 \cdot 3 + 6{,}86 = 8{,}63 \text{ г/(т·ч·°В)} .$$

Определим коэффициент работы САВ в зависимости от влажностного режима насыпи: $K^{\theta}_{\text{в.вл}} = \dfrac{10 \cdot 1000}{8{,}63 \cdot (22 - 14) \cdot 1000} = 0{,}15$. САВ должна работать 0,15·24 ≈ 3 ч. 30 мин. в сутки.

Таким образом, применение методики расчета режимов работы САВ на основе понятия потенциал влажности позволяет сократить время работы САВ, что приводит к снижению затрат на энергоресурсы расходуемые на поддержание оптимальных параметров микроклимата в хранилище и повышению сохранности хранящейся продукции.

Стоит отметить, что оптимизация режимов работы систем обеспечения микроклимата не всегда приводит к сокращению времени работы САВ. В зависимости от расхода и параметров продуваемого воздуха, а также температурно-влажностных параметров насыпи для обеспечения высокой сохранности продукции может потребовать увеличение коэффициента использования вентиляции. Однако, экономический эффект от повышения сохранности продукции несоизмеримо выше дополнительных эксплуатационных затрат на работу систем обеспечения микроклимата.

4.5. Выводы по главе 4

1. Классическая теплофизическая модель тепломассообмена в процессе сушки растительного сырья, основанная на использовании *I–d*-диаграммы влажного воздуха, не позволяет качественно и количественно выявить движущие силы тепломассопереноса в системе «биологически активное сырье – влажный воздух», когда влагообмен должен быть минимальным.

2. Аналогичные затруднения возникают при определении интенсивности тепломассообмена в процессе хранения сочного растительного сырья, когда требуется минимизировать интенсивность влагообмена.

3. Показано, что интенсивность влагообмена между поверхностью сырья и влажным воздухом в процессах сушки и хранения может быть определена только на основе теории полного термодинамического потенциала (потенциала влажности).

4. Дано термодинамическое обоснование нанесения линий постоянных потенциалов $\theta = \text{const}$ на *I–d*-диаграмму влажного воздуха и получены аналитические зависимости для определения значений потенциала влажности в различных диапазонах температуры и относительной влажности воздуха.

5. Для количественного расчета интенсивности влагообмена получены графоаналитические зависимости изотерм сорбции-десорбции в координатах $w_{\text{тр}} - \theta$.

6. Уточнен характер кривых $\theta = \text{const}$ в области низких положительных температур.

7. Разработанная теплофизическая модель процессов переноса влаги с использованием *I–d*–θ-диаграммы позволяет рассчитывать динамику переноса теплоты и влаги в насыпи биологически активного сырья при процессах сушки и хранения, в том числе при различных способах обработки воздуха.

8. Аналитически и экспериментально в натурных условиях показана достаточность естественных источников энергии и возможность использования возобновляемых источников энергии при хранении и сушке биологически активного сырья при использовании атмосферного воздуха в районах Поволжья.

9. Разработанные инженерные методики расчета тепломассопереноса в процессах сушки и хранения сочного растительного сырья на основе градиента потенциала влажности позволяют выявить количественные аэродинамические и теплофизические характеристики процессов и оптимизировать режимные и конструктивные особенности систем обеспечения параметров микроклимата.

Глава 5. ОБЕСПЕЧЕННОСТЬ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАРУЖНЫХ ОГРАЖДЕНИЙ НЕОТАПЛИВАЕМЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ

5.1. Нормирование сопротивления влагопередаче наружных ограждающих конструкций

5.1.1. Использование аналогии процессов тепло- и влагопереноса для расчета требуемого сопротивления влагопередаче

Физико-математическое обоснование теории потенциала влажности основывается на единстве явлений тепло- и массообмена.

Проведем теоретическое сопоставление особенностей динамики тепло- и влагопереноса между воздухом и поверхностью строительных конструкций, приняв в качестве основной функции механизма влагопереноса разность потенциалов влажности. В исследованиях [20, 27, 182] доказана возможность применения классических термодинамических представлений к явлениям переноса вещества.

Теплопроводность и влагопроводность. Основной закон теплопроводности (закон Фурье) устанавливает пропорциональность между удельным потоком теплоты q, Вт/м^2, и градиентом температур:

$$q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} = -\lambda \operatorname{grad} t. \tag{5.1}$$

По аналогии с основным законом теплопроводности удельный поток влаги i, кг/(м^2·ч), пропорционален градиенту потенциала влажности [27]:

$$i = -\chi \frac{\partial \theta}{\partial x} = -\chi \operatorname{grad} \theta. \tag{5.2}$$

Рассмотрим однослойную плоскую стену толщиной δ с коэффициентом теплопроводности λ и коэффициентом влагопроводности χ (рисунок 5.1). Температуры и потенциалы влажности на внутренней и наружной поверхностях стены равны, соответственно, $\tau_{в.п}$, $\tau_{н.п}$, $\theta_{в.п}$, $\theta_{н.п}$.

Зависимости (5.1) и (5.2) для слоя толщиной dx можно привести к виду:

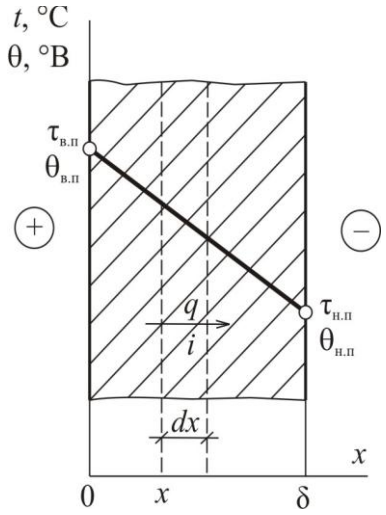


Рисунок 5.1 – К определению интенсивности тепло- и влагопроводности в однослойной плоской стене

$$dt = -\frac{q}{\lambda}dx; \qquad d\theta = -\frac{i}{\chi}dx. \tag{5.3}$$

Проинтегрировав уравнения (5.3), получим:

$$t = -\frac{q}{\lambda}x + C; \qquad \theta = -\frac{i}{\chi}x + C, \tag{5.4}$$

где C – константа интегрирования.

Из уравнений (5.4) видно, что температура и потенциал влажности изменяются по толщине стены по линейному закону. Константа интегрирования C определяется из условий на границах стены.

Для параметров температуры:

– при $x = 0$ $t = \tau_{в.п}$, следовательно $C = \tau_{в.п}$;

– при $x = \delta$ $t = \tau_{н.п}$, уравнение (5.4) принимает вид: $\tau_{н.п} = -\frac{q}{\lambda}\delta + \tau_{в.п}$.

Таким образом, удельный тепловой поток q, Вт/м^2, определяется по известному выражению:

$$q = \frac{\lambda}{\delta}\left(\tau_{в.п} - \tau_{н.п}\right). \tag{5.5}$$

Для параметров интенсивности потоков влаги:

– при $x = 0$ $\theta = \theta_{в.п}$, следовательно $C = \theta_{в.п}$;

– при $x = \delta$ $\theta = \theta_{н.п}$, уравнение (5.4) принимает вид: $\theta_{н.п} = -\frac{i}{\chi}\delta + \theta_{в.п}$.

Следовательно, величина удельного потока влаги i, кг/(м^2·ч), определяется из выражения:

$$i = \frac{\chi}{\delta}\left(\theta_{\text{в.п}} - \theta_{\text{н.п}}\right). \qquad (5.6)$$

Конвекция. Удельный тепловой поток q, Вт/м^2, передаваемый при конвективном теплообмене воздуха с ограждающей конструкцией, определяется по формуле Ньютона:

$$q = \alpha\left(t - \tau_{\text{в.п}}\right), \qquad (5.7)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м^2·ºС); t – температура воздуха, ºС; $\tau_{\text{в.п}}$ – температура поверхности стены, ºС.

Для процесса влагообмена на внутренней поверхности ограждения уравнение (5.7) представим в виде:

$$i = \beta_{\text{в}}^{\theta}\left(\theta_{\text{в}} - \theta_{\text{в.п}}\right); \qquad (5.8)$$

на наружной поверхности ограждения:

$$i = \beta_{\text{н}}^{\theta}\left(\theta_{\text{н.п}} - \theta_{\text{н}}\right), \qquad (5.9)$$

где $\beta_{\text{в}}^{\theta}$ – коэффициент влагообмена внутренней поверхности ограждающей конструкции, кг/(ч·м^2·ºВ); $\beta_{\text{н}}^{\theta}$– коэффициент влагообмена наружной поверхности ограждающей конструкции, кг/(ч·м^2·ºВ); $\theta_{\text{в}}$, $\theta_{\text{н}}$ – потенциал влажности внутреннего и наружного воздуха, ºВ;

По формулам (5.8) и (5.9) определяется удельный поток влаги i, кг/(м^2·ч), в процессах *увлажнения* или *сушки* наружных ограждений.

Рассмотрим процессы тепло- и влагопередачи через плоскую однослойную стену с коэффициентом теплопроводности λ и коэффициентом влагопроводности χ (рисунок 5.2). Температуры и потенциалы влажности внутреннего и наружного воздуха равны, соответственно, $t_{\text{в}}$, $t_{\text{н}}$, $\theta_{\text{в}}$, $\theta_{\text{н}}$, коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности стены составляет $\alpha_{\text{в}}$, наружной поверхности $\alpha_{\text{н}}$, Вт/(м^2·°С), коэффициенты влагообмена внутренней и наружной поверхностей стены равны $\beta_{\text{в}}^{\Theta}$ и $\beta_{\text{н}}^{\Theta}$, кг/(ч·м^2·ºВ).

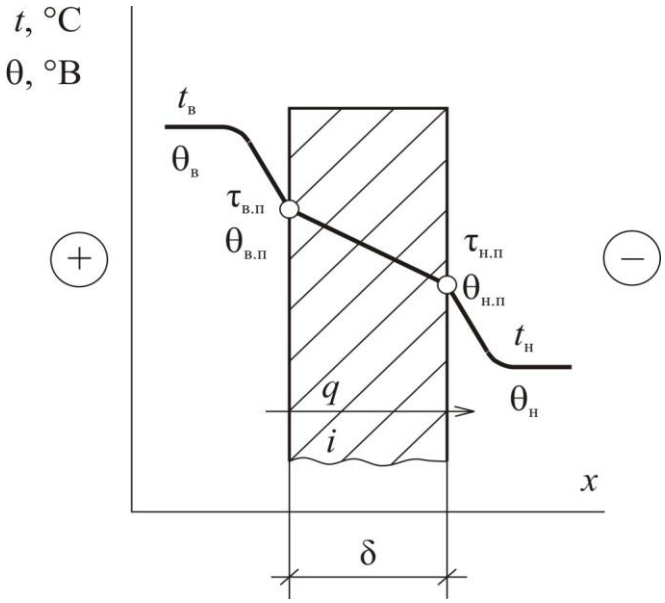


Рисунок 5.2 – Тепло- и влагопередача через плоскую стену

Передача теплоты в рассматриваемом примере при постоянном удельном тепловом потоке q, Вт/м^2, складывается из теплоотдачи от внутреннего воздуха внутренней поверхности стены, теплопроводности через стену и теплоотдачи от наружной поверхности стены наружному воздуху.

Удельный тепловой поток равен:

$$q = \frac{t_в - t_н}{\frac{1}{\alpha_в} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_н}} = \frac{t_в - t_н}{R_0}. \qquad (5.10)$$

Величина, R_0, м^2·°С/Вт, представляет собой сопротивление теплопередаче глади ограждения и оценивает теплозащитные характеристики ограждения. Рассмотрим физические явления при процессе влагопередачи через плоскую однослойную стену. Процесс влагопередачи осуществляется в три этапа: влагообмен внутреннего воздуха с внутренней поверхностью стены; влагопроводность через стену; влагообмен наружной поверхности стены с наружным воздухом. Соответствующие закономерности переноса влаги за счет разности потенциалов влажности между внутренним и наружным воздухом в холодный период года, учитывая равенство удельных потоков влаги i в каждом из трех указанных этапов:

– влагообмена внутреннего воздуха с внутренней поверхностью стены:

$$i = \beta_в^{\theta}(\theta_в - \theta_{в.п}); \qquad (5.11)$$

– влагопроводности через стену:

$$i = \frac{\chi}{\delta}\left(\theta_{\text{в.п}} - \theta_{\text{н.п}}\right); \tag{5.12}$$

– влагообмена наружной поверхности стены с наружным воздухом:

$$i = \beta_{\text{н}}^{\theta}\left(\theta_{\text{н.п}} - \theta_{\text{н}}\right). \tag{5.13}$$

Решим уравнения (5.11…5.13) относительно разностей потенциалов влажности:

$$\left.\begin{aligned} &\left(\theta_{\text{в}} - \theta_{\text{в.п}}\right) = i\frac{1}{\beta_{\text{в}}^{\theta}}; \\ &\left(\theta_{\text{в.п}} - \theta_{\text{н.п}}\right) = i\frac{\delta}{\chi}; \\ &\left(\theta_{\text{н.п}} - \theta_{\text{н}}\right) = i\frac{1}{\beta_{\text{н}}^{\theta}}. \end{aligned}\right\} \tag{5.14}$$

Из системы уравнений (5.14) имеем зависимость для определения удельного потока влаги i, кг/(м^2·ч):

$$i = \frac{\theta_{\text{в}} - \theta_{\text{н}}}{\dfrac{1}{\beta_{\text{в}}^{\theta}} + \dfrac{\delta}{\chi} + \dfrac{1}{\beta_{\text{н}}^{\theta}}} = \frac{\theta_{\text{в}} - \theta_{\text{н}}}{R_{\theta,0}}. \tag{5.15}$$

Величина $R_{\theta,0}$, м^2·ч·°В/кг, приведенное сопротивление влагопередаче, равна:

$$R_{\theta,0} = \frac{1}{\beta_{\text{в}}^{\theta}} + \frac{\delta}{\chi} + \frac{1}{\beta_{\text{н}}^{\theta}}. \tag{5.16}$$

Значения сопротивлений влагообмену на поверхностях ограждения $\dfrac{1}{\beta_{\text{в}}^{\theta}}$ и $\dfrac{1}{\beta_{\text{н}}^{\theta}}$, м^2·ч·°В/кг, пренебрежимо малы, поэтому в инженерных расчетах для определения сопротивления влагопередаче $R_{\theta,0}$ однослойной или многослойной ограждающей конструкции можно использовать зависимость:

$$R_{\theta,0} = \sum_{i=1}^{n}\frac{\delta_i}{\chi_i}. \tag{5.17}$$

Величина сопротивления влагопередаче $R_{\theta,0}$ оценивает влагозащитные характеристики наружных ограждений и показывает количественно разность потен-

циалов влажности $\Delta\theta$, °В, при которой через 1 м^2 стены в течение 1 ч передается 1 кг влаги.

В технической литературе [27] приводятся данные о значениях коэффициентов влагопроводности строительных материалов в шкале потенциала влажности $\chi(\theta_н)$, однако они основаны на экспериментальных данных для ограниченного количества строительных материалов.

Для возможности практического применения зависимости (5.17) необходим аналитический способ определения коэффициента влагопроводности χ, кг/(м·ч·°В), для любого строительного материала в шкале потенциала влажности.

Согласно теории диффузии пара количество влаги *I*, кг, диффундирующей через плоскую стенку, состоящую из однородного материала, определяется по формуле:

$$I = (e_в - e_н)Fz\mu / \delta, \tag{5.18}$$

где *F* – площадь ограждения, м^2; *z* – время прохождения пара в количестве *I*, кг, через ограждение, ч; μ – коэффициент паропроницаемости материала, кг/(м·ч·Па);

С точки зрения теории потенциала влажности количество влаги *I*, кг, проходящей сквозь плоскую стенку, равно:

$$I = (\theta_в - \theta_н)Fz\chi / \delta, \tag{5.19}$$

Принимая равенство количеств влаги *I*, полученных по (5.18) и (5.19), имеем систему уравнений для однослойной конструкции:

$$\begin{cases} I = (e_в - e_н)Fz\mu / \delta; \\ I = (\theta_в - \theta_н)Fz\chi / \delta. \end{cases} \tag{5.20}$$

Решив данную систему, определим коэффициент влагопроводности материала χ,кг/(м·ч·°В):

$$\chi = \frac{(e_в - e_н)}{(\theta_в - \theta_н)}\mu. \tag{5.21}$$

На основании формулы (5.21) на рисунке 5.3 построена графическая зависимость между коэффициентом влагопроводности пенобетона χ и разницей потенциалов влажности внутреннего и наружного воздуха $\Delta\theta$, °В. Значения упруго-

сти водяного пара $e_в$ и потенциала влажности внутреннего воздуха $\theta_в$ рассчитывались при $t_в$ = 20 °С и $\varphi_в$ = 55 % по зависимостям (1.21) и (4.14, 4.15), соответственно. Величины $e_н$ и $\theta_н$ вычислялись при температурах наружного воздуха $t_н$ = 10…– 50 °С и значении относительной влажности наружного воздуха $\varphi_н$ = 80 %, характерном для наиболее холодного месяца в большинстве городов России. Из сравнения графических зависимостей, изображенных на рисунке 1.39 [27] и рисунке 5.3, вытекает, что значения коэффициентов влагопроводности пенобетона χ, кг/(м·ч·°В), полученные экспериментальным [27] и аналитическим путем по (5.21), имеют достаточную сходимость и лежат в пределах от $1{,}0\cdot10^{-5}$ до $2{,}5\cdot10^{-5}$ кг/(м·ч·°В) [39].

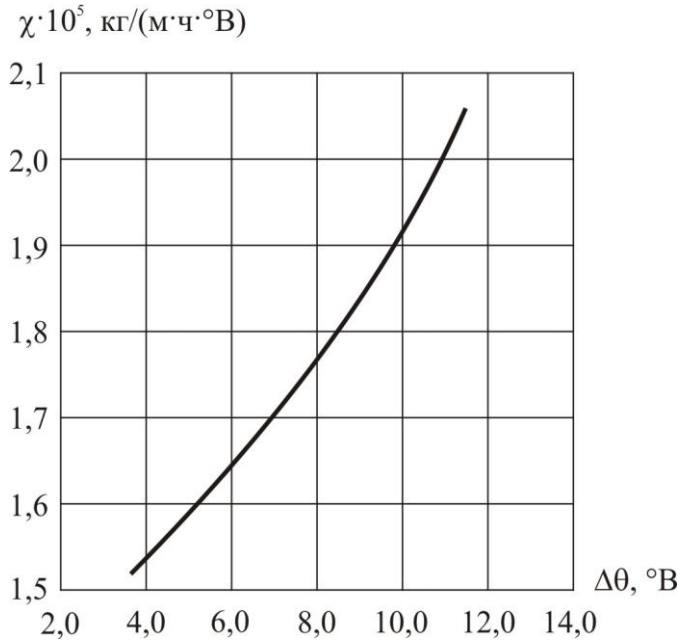


Рисунок 5.3 – Зависимость коэффициента влагопроводности пенобетона от разности потенциалов влажности внутреннего и наружного воздуха

В таблице 5.1 представлены значения коэффициентов влагопроводности для некоторых строительных материалов, рассчитанные по зависимости (5.21) при расчетных параметрах наружного воздуха, принятых по СП [260] для Самарской области ($t_н$ = –30 °С, $\varphi_н$ = 84 %, $e_н$ = 220 Па) и следующих параметрах внутреннего воздуха – $t_в$ = 20 °С, $\varphi_в$ = 55 %; погрешность расчета не превышает 5 % [161].

Таблица 5.1 – Значения коэффициентов влагопроводности для некоторых строительных материалов

№ п/п	Наименование материала	Плотность ρ_0, кг/м^3	Коэффициент паропроницаемости μ, мг/(м·ч·Па)	Коэффициент влагопроводности $\chi\times10^5$, кг/(м·ч·°В)
1	Кирпичная кладка из керамического пустотного кирпича плотностью 1400 кг/м^3 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
4	то же	1000	0,14	1,4
5	"	800	0,19	1,8
6	Полистиролбетон (ячеистый бетон)	600	0,068	0,7
7	Листы асбестоцементные плоские	1800	0,03	0,3
8	Сосна и ель вдоль волокон	500	0,32	3,1
9	Плиты минераловатные	100	0,56	5,4

Для многослойных конструкций наружных ограждений система уравнений (5.20) усложняется на количество слоев конструкции, как по разности парциальных давлений, так и по разности потенциалов влажности. Например, для трехслойной конструкции наружной стены (рисунок 5.4) имеем три взаимосвязанные системы:

$$\begin{cases} i = (e_{\text{в}} - e_{\text{II}})\mu_1 / \delta_1; \\ i = (\theta_{\text{в}} - \theta_{\text{II}})\chi_1 / \delta_1; \end{cases} \tag{5.22}$$

$$\begin{cases} i = (e_{\text{II}} - e_{\text{III}})\mu_2 / \delta_2; \\ i = (\theta_{\text{II}} - \theta_{\text{III}})\chi_2 / \delta_2; \end{cases} \tag{5.23}$$

$$\begin{cases} i = (e_{\text{III}} - e_{\text{н}})\mu_3 / \delta_3; \\ i = (\theta_{\text{III}} - \theta_{\text{н}})\chi_3 / \delta_3. \end{cases} \tag{5.24}$$

При равенстве удельного потока влаги через каждый из слоев конструкции стены имеем аналитические зависимости коэффициентов влагопроводности χ в

размерности потенциала влажности:

$$\chi_1 = (e_{\text{в}} - e_{\text{II}})\mu_1 / (\theta_{\text{в}} - \theta_{\text{II}}); \tag{5.25}$$

$$\chi_2 = (e_{\text{II}} - e_{\text{III}})\mu_2 / (\theta_{\text{II}} - \theta_{\text{III}}); \tag{5.26}$$

$$\chi_3 = (e_{\text{III}} - e_{\text{н}})\mu_3 / (\theta_{\text{III}} - \theta_{\text{н}}). \tag{5.27}$$

Определение парциальных давлений водяных паров в толще наружной стены проводится по общепринятой в строительной теплофизике методике [170]:

$$e_x = e_{\text{в}} - (e_{\text{в}} - e_{\text{н}})R_{\text{п},\,x} / R_{\text{п}}, \tag{5.28}$$

где $e_{\text{в}}$ – парциальное давление водяного пара внутреннего воздуха, Па; $e_{\text{н}}$ – парциальное давление водяного пара наружного воздуха, Па; $R_{\text{п},\,x}$ – сопротивление паропроницанию части многослойной ограждающей конструкции, считая от внутренней поверхности до плоскости, отстоящей от внутренней поверхности на расстоянии x; $R_{\text{п}}$ – сопротивление паропроницанию многослойной ограждающей конструкции, м^2·ч·Па/мг.

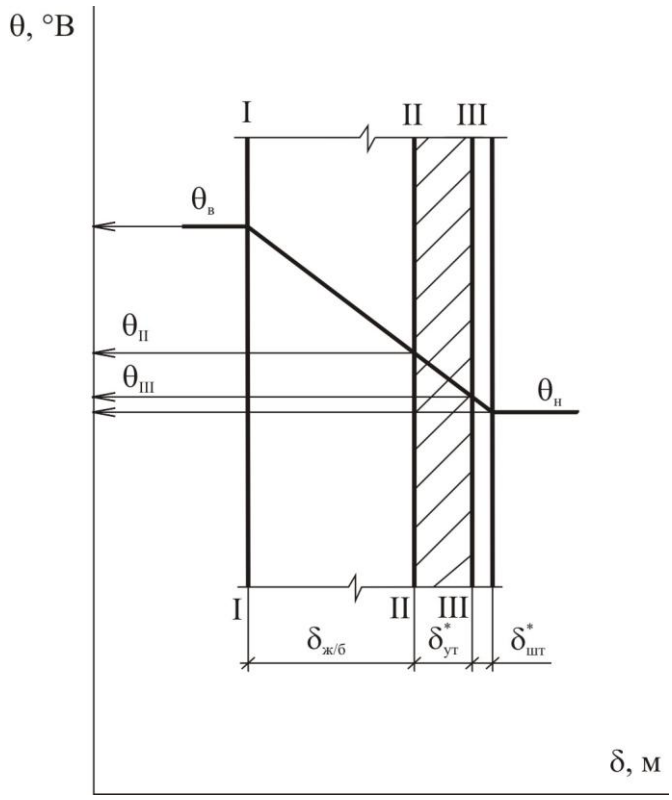


Рисунок 5.4 – Определение значений потенциалов влажности в толще наружной стены

Последовательность определения значений потенциалов влажности в толще многослойного ограждения. 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 (рисунок 5.4). Задача определения потенциала влажности в любом сечении толщи стены сводится к построению графической зависимости $\theta = f(\delta)$ для полученной условной однослойной конструкции [39].

При переходе к реальным толщинам наружной стены и коэффициентам паропроницаемости слоев μ значения потенциалов влажности определяются интерполированием при постоянстве разностей потенциалов влажности на границах слоев, полученных для условной однослойной конструкции.

5.1.2. Ограничения при расчете сопротивления влагопередаче наружных ограждений

Физико-математические ограничения при расчете сопротивления влагопередаче наружных ограждений производственных сельскохозяйственных зданий на основе разности потенциалов влажности $R_{\theta,0}$ отсутствуют. Однако имеются ограничения, связанные с функциональным назначением здания, технологией производства, способами поддержания оптимальных и допустимых параметров микроклимата.

Из условий энергосбережения производственные сельскохозяйственные здания не должны использовать в процессе эксплуатации искусственно генерируемую теплоту, подаваемую извне. Нормирование сопротивления теплопередаче $R_0^{тр}$ осуществляется по зависимостям (1.8) и (1.9). Этим достигается полная утилизация явной биологической теплоты животных, птиц, хранящегося сочного растительного сырья в холодный и переходный периоды года. Поэтому учет требуемого $R_0^{тр}$ и действительных сопротивлений теплопередаче наружных стен $R^{д}_{0\,ст}$ и покрытий $R_{0\,покр}$ (1.13) является обязательным условием при разработке методики нормирования и последовательно-

сти расчетов сопротивлений влагопередаче $R_{\theta}^{тр}$ теплового контура зданий.

Однако, в реальных условиях сельскохозяйственные производственные здания не являются полностью неотапливаемыми сооружениями даже при наличии наружных ограждений, теплотехнические характеристики которых соответствуют вышеприведенным величинам. Это вызвано необходимостью удалять влагу, выделяемую в процессе жизнедеятельности животных, птиц, хранящейся продукции.

Использование естественных источников энергии для обеспечения температурно-влажностных режимов животноводческих помещений базируется на зависимости [97]:

$$\frac{Q_{б} - Q_{п}}{i_{в} - i_{н}} = \frac{Q_{в}}{i_{в} - i_{н}} \geq \frac{G_{вл} 1000}{d_{уд} - d_{пр}}, \qquad (5.29)$$

где $Q_{п}$ – суммарные теплопотери помещением, Вт; $Q_{в}$ – максимальные теплозатраты на нагрев наружного вентиляционного воздуха, необходимого для ассимиляции выделяемой животными влаги, без подвода искусственно генерируемой теплоты, Вт; $G_{вл}$ – количество влаги выделяемой животными в помещение, кг/ч; $i_{в}$, $i_{н}$ – удельная энтальпия, соответственно, внутреннего и наружного (приточного) воздуха, Вт·ч/кг; $d_{уд}$, $d_{пр}$ – влагосодержание, соответственно, удаляемого и приточного воздуха, г/кг сух. в-ва.

Физический смысл уравнения (5.29) формулируется следующим образом: ограждающие конструкции неотапливаемых сельскохозяйственных помещений должны обладать таким сопротивлением теплопередаче, чтобы теплопотери через них не превышали доли биологической теплоты, оставшейся после нагрева расчетного количества наружного вентиляционного воздуха.

Графические зависимости, позволяющие характеризовать тепловые и воздушные балансы животноводческих и птицеводческих помещений, приведены на рисунке 5.5. Они построены в системе взаимосвязанных координат. По оси ординат слева относительный расход воздуха $G/G_{н.min}$ — отношение реального расхода воздуха в помещении G к минимальному требуемому расходу для удаления влаги $G_{н.min}$. На этой же оси справа показан относительный расход теплоты $Q_{б}/Q_{наг}$ —

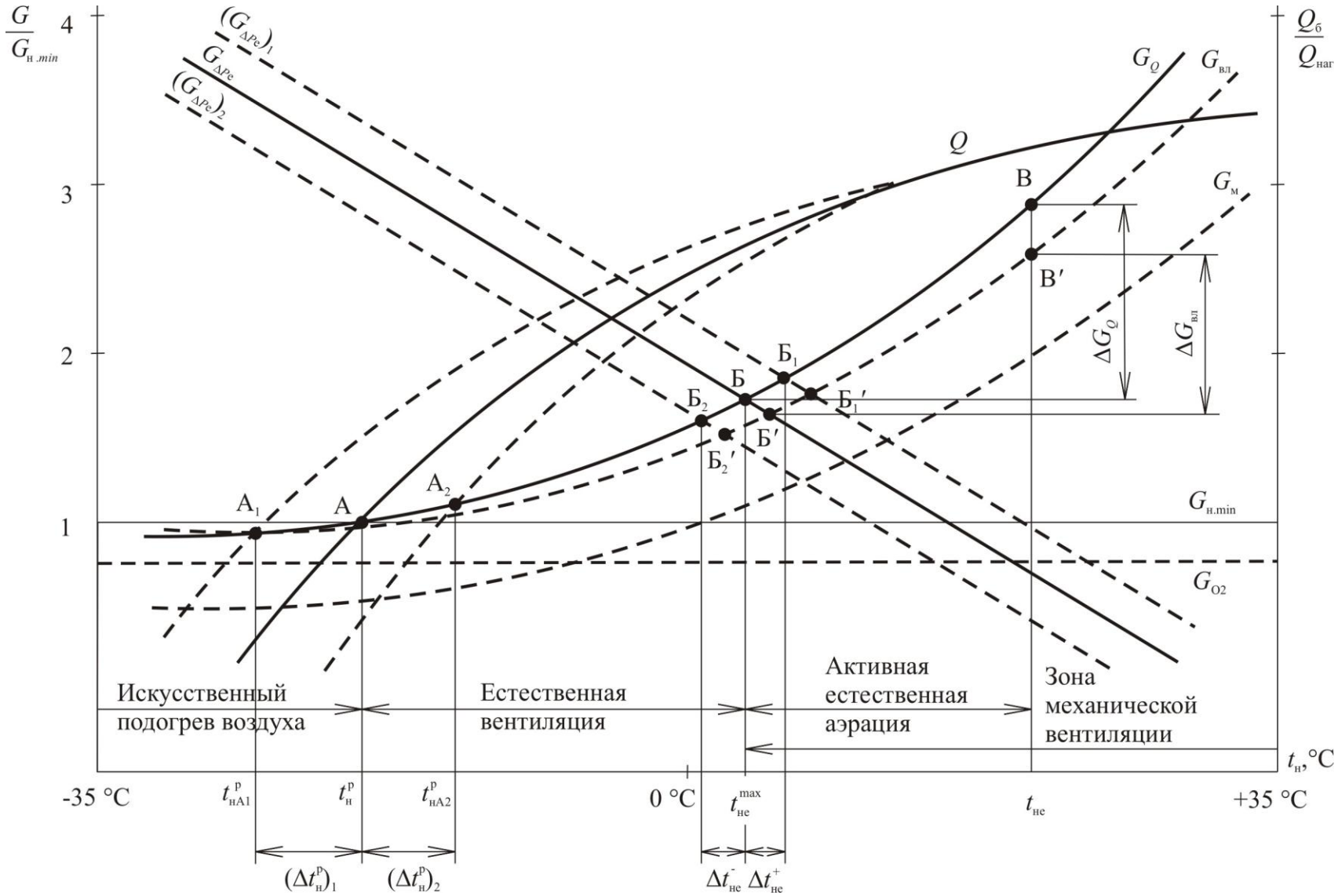


Рисунок 5.5 – Анализ параметров микроклимата сельскохозяйственных помещений

отношение явных биологических тепловыделений $Q_б$ к расходу теплоты на нагрев приточного воздуха $Q_{наг}$, Вт.

Отношение $Q_б/Q_{наг}$ = 1,0 для неотапливаемых помещений при условной температуре наружного воздуха $t_н^р$, определяемой по (1.25). Избыток или недостаток теплоты в помещении показан кривой Q, характеризующей тепловой баланс неотапливаемого помещения в конкретный период года.

Данная переменная является функцией: величины сопротивления теплопередаче теплового контура; температуры наружного воздуха; степени заполнения помещения животными, птицами или хранящейся продукцией.

Горизонтальные прямые $G_{н.min}$ и G_{O_2} показывают необходимый воздухообмен: по удалению водяных паров; по требуемому для дыхания животных и птиц кислороду. Воздухообмен по этим показателям практически определяется только количеством животных или птиц, находящихся в помещении.

Кривые, характеризующие расходы приточного воздуха для ассимиляции избытков явной теплоты G_Q, влаги $G_{вл}$ и вредных или взрывоопасных газов $G_м$, показывают необходимый воздухообмен в цикле круглогодичной эксплуатации животноводческих и птицеводческих помещений. Они строятся по балансовым уравнениям явной теплоты, влаги, вредных или взрывоопасных газов. Прямая $G_{\Delta p_e}$ показывает максимальную величину возможного воздухообмена в помещении за счет систем естественной вентиляции.

Точка А (точка пересечения кривой Q с кривыми G_Q или $G_{вл}$) является характерной точкой, определяющей границу наружной температуры воздуха для конкретного неотапливаемого сельскохозяйственного помещения, при которой возможно поддержание расчетных внутренних параметров воздуха за счет естественных факторов. Она соответствует температуре наружного воздуха $t_н^р$, ниже которой требуется подогрев поступающего в помещение наружного воздуха.

Зоны вентиляции помещений без подогрева наружного воздуха могут быть расширены на величину: $\left(\Delta t_н^р\right)_1 = \left(t_н^р - t_{нА1}^р\right)$ в сторону более низкой температуры наружного воздуха, например, до $t_{нА1}^р$ (кривая Q проходит через точку $А_1$). Такой

процесс возможен при увеличении сопротивления теплопередаче наружных ограждений путем дополнительного их утепления. Конструкции наружных ограждений с заниженными сопротивлениями теплопередаче приводят к повышению значений температуры наружного воздуха $t^{\text{р}}_{\text{нА2}}$ (точка $А_2$). Зона естественной вентиляции помещений без подогрева приточным воздухом сужается на следующую величину: $\left(\Delta t^{\text{р}}_{\text{н}}\right)_2 = \left(t^{\text{р}}_{\text{нА2}} - t^{\text{р}}_{\text{н}}\right)$.

Точка Б, лежащая на пересечении кривой G_Q с прямой $G_{\Delta p_e}$ (точка Б′ при пересечении $G_{\text{вл}}$ с $G_{\Delta p_e}$, когда $G_{\text{вл}} > G_Q$), определяет ту наивысшую наружную температуру $t^{\max}_{\text{н.е}}$, при которой естественное давление $\Delta p_{\text{е}} = \Delta p_{\text{г}} + \Delta p_{\text{в}}$ обеспечивает подачу в помещение расчетное количество наружного воздуха. Таким образом, интервал наружных температур между точками А и Б является зоной естественной вентиляции помещений. Количество явной биологической теплоты в этом интервале достаточно для подогрева приточного воздуха, а естественное давление обеспечивает необходимый воздухообмен.

Положение точки Б (Б′) на графике может быть смещено в сторону более высоких температур наружного воздуха на величину $\Delta t^{+}_{\text{н.е.}}$. Зона естественной вентиляции расширяется при уменьшении потерь давления циркулирующего в помещении воздуха, чему соответствует прямая $\left(G_{\Delta p_{\text{е}}}\right)_1$ и ее пересечение с кривой G_Q (точка $Б_1$) или $G_{\text{вл}}$ (точка $Б'_1$). Любое дополнительное сопротивление в системе естественной вентиляции, например, линия $\left(G_{\Delta p_{\text{е}}}\right)_2$ приводит к сужению зоны естественной вентиляции (точка $Б_2$ или $Б'_2$) на величину $\Delta t^{-}_{\text{н.е}}$.

Зона естественной вентиляции (в сторону повышения значений наружной температуры) может быть расширена за счет применения активной естественной аэрации. Эта возможная зона располагается между точками Б и В. Дополнительный воздухообмен при использовании активной аэрации выражается величиной ΔG_Q ($\Delta G_{\text{вл}}$). Он расширяет область естественной вентиляции до максимально возможной температуры наружного воздуха $t_{\text{н.е}}$, выше которой необходимо прибегать к использованию систем механической вентиляции.

Рассмотренные основные ограничения по использованию энергии обязательны при выборе расчетных характеристик для нормирования сопротивления влагопередаче наружных ограждений производственных сельскохозяйственных зданий.

Холодный период года. Под холодным периодом года считаем период года с температурой наружного воздуха ниже условной температуры, начиная с которой физиологических явных тепловыделений недостаточно для подогрева наружного воздуха ($t_н < t_н^р$). На рисунке 5.5 этот период назван зоной искусственного подогрева воздуха.

В климатической зоне с $t_н$ = –30 °С условная наружная температура наружного воздуха лежит в пределах $t_н^р = -14...-16$ °С. С учетом того, что расчетная температура наиболее холодного месяца (января) в центральной части России $t_н^I \geq -12$ °С, то период времени в течение года с $t_н^I < t_н^р$ не превышает 8…10 суток. В этот период температура внутреннего воздуха при расчетном воздухообмене $G_{н.min}$ ($L_{н.min}$), определяемом по (1.23), может понизиться до $t_в$ = 5…6 °С. Однако такое относительно кратковременное понижение температуры $t_в$ практически не приводит к снижению удоев и не отражается на жизнедеятельности КРС [17, 51, 69, 135, 137, 218].

В холодный период года допускается снижение удельных воздухообменов до 2,5…3,0 м^3/(ч·ц) и даже ниже [230]. В реальных условиях России по литературным данным и нашим собственным исследованиям коровников организованная естественная или механическая вентиляция, как правило, отсутствуют полностью. Как отмечается в [51], даже полное отсутствие вентиляции практически не меняет газовый состав воздуха в коровниках. В то же время даже при $t_н^р < t_н$ в коровниках наблюдается туманообразование (особенно вблизи регулярно открываемых ворот), конденсация водяных паров на внутренних поверхностях ограждений, льдообразование на окнах. Отметим, что некоторые исследователи допускают временную конденсацию водяных паров на внутренних поверхностях [304].

Переходный период года. Переходными периодами года считаем периоды

года со стороны осени или весны, когда температура наружного воздуха лежит в пределах от $t_{н}^{р}$ до $t_{н.е}^{max}$ (на рисунке 5.5 этот промежуток назван зоной естественной вентиляции). Температура $t_{н.е}^{max}$ соответствует допустимой температуре внутреннего воздуха $t_{в}$, начиная с которой возможна активная аэрация помещений (открытые окна, ворота и т.п.) при привязном содержании животных. При свободно-выгульном содержании температура $t_{н.е}^{max}$ соответствует времени начала выпаса животных.

Наибольшая нагрузка на системы естественной вентиляции наблюдается при удалении теплоизбытков в период, близкий к температурам $t_{н.е}^{max}$ (точка Б на пересечении $G_{\Delta p_e}$ и G_Q на рисунке 5.5). Естественный воздухообмен в помещении осуществляется при совместном действии гравитационной и горизонтальной систем вентиляции.

Теплый период года. Теплым является период года с температурой наружного воздуха выше $t_{н.е}^{max}$ (рисунок 5.5). В этот период в помещениях находятся только животные с привязным содержанием. Для снижения температуры воздуха в помещении используются все способы естественной вентиляции: гравитационная, ветровая, активная аэрация.

Начиная с температуры наружного воздуха $t_{н.е}$, необходимо использовать механическую вытяжную вентиляцию (при неорганизованной подаче приточного воздуха). Возможности естественной вентиляции в этот период полностью задействованы, но недостаточны для удаления из помещения избытков теплоты. В некоторых случаях при привязном содержании высокопродуктивных или элитных животных, особенно в южных районах страны, возможно искусственное охлаждение приточного воздуха.

В процессе эксплуатации теплофизические характеристики наружных ограждений не должны меняться со временем. Животноводческие и птицеводческие помещения, хранилища картофеля и овощей в холодный период года эксплуатируются с относительной влажностью воздуха $\varphi_{в} \geq 75$ %, то есть относятся к влажным или мокрым. Для таких помещений в нормальной или влажной зонах влаж-

ности территории строительства эксплуатационные теплофизические характеристики материалов (λ [Вт/(м·°С)], теплоусвоения s [Вт/(м^2·°С)] при периоде 24 часа) должны приниматься по графе градации Б*, как это рекомендовалось ранее в СНиП II-А.7-71 [254].

Особо важной для строительных материалов является зависимость коэффициента теплопроводности λ от влажности, так как с увеличением влажности материалов коэффициент теплопроводности возрастает.

В действующих в настоящее время Своде Правил, включая СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий», актуализированная редакция СНиП 23-02–2003 [261], отсутствуют теплофизические характеристики строительных материалов, эксплуатирующихся во влажных и мокрых помещениях, соответствующие графе градации Б* (расчетные величины коэффициентов теплопроводности строительных материалов, соответствующие условию Б, следует увеличивать на 10 %). Следствием этого является увлажнение материалов наружных ограждений в процессе эксплуатации сельскохозяйственных зданий и повышение значений их коэффициентов теплопроводности. Нарушается рассчитанный тепловой баланс помещений, приводящий к нерасчетному понижению температуры внутреннего воздуха, то есть повышению энергоемкости зданий [36].

Следует также отметить, что в нормативном методе расчета влажностного режима наружных ограждений не учитывается расположение материального слоя в конструкции, поэтому его можно применять только для однослойного ограждения. Нами обоснована и предложена методика расчета влажностного режима многослойного ограждения путем замены его однослойным по аналогии с методом конечных разностей температур при нестационарной теплопередаче через ограждение.

На рисунке 5.6 показана конструкция ограждения: конструктивный слой толщиной δ_1, м, (1), имеющий коэффициент паропроницаемости μ_1, г/(м·ч·Па); тепловая изоляция δ_2 и μ_2 (2), конструктивный слой δ_3, $\mu_3 = \mu_1$ (3). Слой тепловой изоляции приводим к эквивалентной толщине конструктивного слоя $\delta_2^* = \delta_2\mu_1/\mu_2$,

м. Полная толщина ограждения в координатах p–δ составит $\delta_{об} = \delta_1 + \delta_2^* + \delta_3$. Таким образом, многослойное ограждение приведено к однослойному.

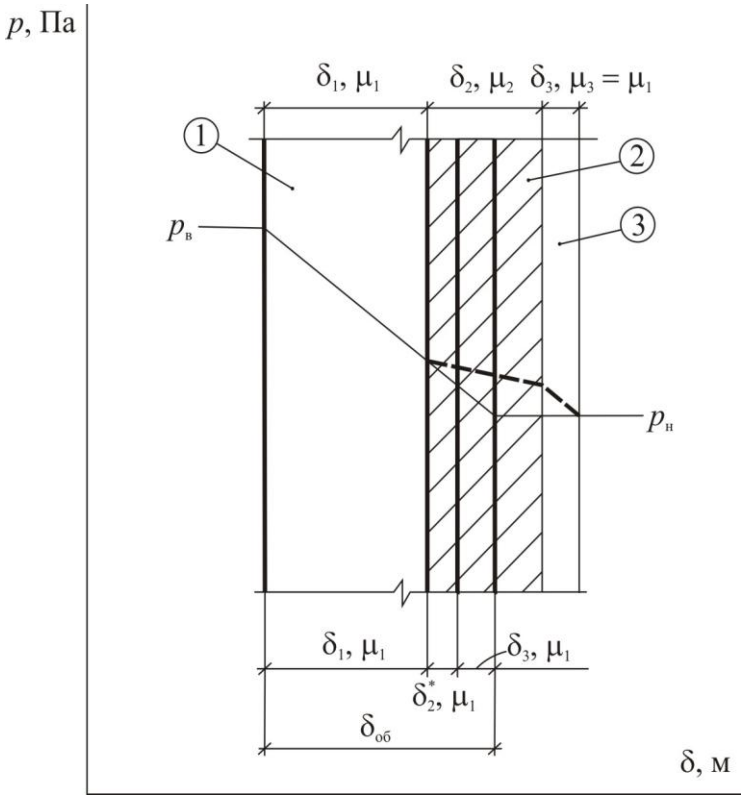


Рисунок 5.6 – К расчету влажностного режима многослойного ограждения

5.2. Нормирование величины сопротивления влагопередаче

5.2.1. Методический подход к определению требуемого сопротивления влагопередаче

За основу нормирования сопротивления теплопередаче неотапливаемых производственных сельскохозяйственных зданий принят удельный тепловой поток $q_б^н = (1-m)Q_б / F$ (1.8, 1.9).

Требуемое сопротивление влагопередаче $R_\theta^{тр}$, м^2·ч·ºВ/кг, определяется по зависимости, аналогичной (1.5) [159]:

$$R_\theta^{тр} = \frac{(\theta_в - \theta_н)}{i^н} = \frac{(\theta_в - \theta_н)}{\Delta\theta^н \beta_в^\theta}, \qquad (5.30)$$

где $\Delta\theta^н$ – перепад потенциалов влажности внутреннего воздуха и внутренней поверхности ограждающей конструкции, ºВ.

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

$$i^{н} = \Delta\theta^{н}\beta_{в}^{\theta}. \qquad (5.31)$$

Обоснование этого принципиального положения заключается в следующем. В главе 1 показано, что неотапливаемые производственные сельскохозяйственные здания и сооружения относятся к специальному классу по нормированию теплофизических характеристик наружных ограждений. В разделах 1.1.1 и 5.1.2 проведен анализ существующих методов нормирования сопротивления теплопередаче и показаны границы использования естественных источников энергии (утилизация биологической теплоты), а также области применения естественной вентиляции для поддержания допустимых параметров микроклимата в помещениях.

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 [39].

Теплотехнические расчеты производственных сельскохозяйственных зданий различного функционального назначения позволяют обосновывать близкие к оптимальным объемно-планировочные решения зданий и конструкций наружных ограждений с учетом технологических и технико-экономических показателей. Необходимость нормирования требуемого сопротивления влагопередаче $R_{\theta}^{тр}$ заключается в важности поддержания круглогодичного влажностного режима ограждений при расчетных условиях для предотвращения снижения теплотехнических показателей теплового контура здания.

5.2.2. Методика расчета коэффициента влагообмена

Точное определение коэффициента влагообмена внутренней поверхности ограждения $\beta_{в}^{\theta}$, кг/(ч·м^2·°В), является сложной задачей.

Для оценки величины $\beta_{в}^{\theta}$ была сделана попытка взять за основу результаты исследований процессов тепло- и массообмена при обработке воздуха в контактных аппаратах [141]. В работе [292] обоснована невозможность аналитического определения коэффициента массообмена Nu_{θ} из равенства диффузионного и массообменного чисел Нуссельта ($\mathrm{Nu}_{d} = \mathrm{Nu}_{\theta}$).

Таким образом, не представляется возможным определять аналитически коэффициент влагообмена $\beta_{в}^{\theta}$, а, следовательно, и требуемое сопротивление влагопередаче наружных ограждений производственных сельскохозяйственных зданий $R_{\theta}^{тр}$ по зависимости (5.30).

Неотапливаемые производственные сельскохозяйственные здания по нормированию теплофизических характеристик теплового контура выделены в специальный класс (раздел 1.1.1). Особенностью формирования в них температурно-влажностных параметров микроклимата является как наличие постоянных круглогодичных явных тепловыделений теплоты, так и постоянных биологических и физиологических выделений влаги от животных, птиц, хранящейся продукции. Поэтому через наружные ограждения должна удаляться не только избыточная теплота, но и накапливающаяся в помещении влага. Расчет количества физиологической и биологической влаги, выделяемой животными, птицей, сочным растительным сырьем $G_{вл}$, кг/ч, приведен в разделе 1.1.1. Определение дополнительного количества испаряющейся в помещении влаги от навоза, помета, подстилки, пола, поилок, систем навозоудаления $G_{вл}^{д}$, кг/ч, дано в [44, 159]. Общее количество выделяемой в воздух помещения влаги составляет:

$$G_{вл}^{о} = G_{вл} + G_{вл}^{д}. \qquad (5.32)$$

Естественная вентиляция производительностью $G_{н.min}$, кг/ч, ($L_{н.\ min}$, м^3/ч), определяемой по (1.23), обеспечивает в расчетных условиях удаление выделяющихся водяных паров до температуры наружного воздуха $t_{н}^{р}$, °С, начиная с которой в помещении наблюдается дефицит теплоты (формула 1.25, рисунок 5.5). В этот интервал времени (до 15 суток в год), когда $t_{н} < t_{н}^{р}$, подача наружного воздуха

практически прекращается. В помещении начинает скапливаться влага, относительная влажность воздуха повышается практически до $\varphi_в$ = 95…100 %, происходит интенсивная конденсация водяных паров на внутренних поверхностях ограждений, увлажнение последних и образование наледи на окнах. Именно данные экстремальные температурно-влажностные условия в помещениях неотапливаемых производственных сельскохозяйственных зданий и сооружений следует принимать за расчетные.

Рассматриваемые здания обычно одноэтажные, прямоугольной в плане формы, бесчердачные. При закрытых воротах, дверях и окнах при отсутствии вентиляции влага может удаляться только через наружные стены и покрытия площадью $F = F_{ст} + F_{покр}$, м^2. Поэтому расчетный (нормируемый) удельный поток влаги через них $i^н$, кг/(м^2·ч), составляет:

$$i^н = G^о_{вл} / F . \qquad (5.33)$$

Приравнивая значения $i^н$ по (5.31) и (5.33), имеем:

$$\Delta\theta^н \beta^\theta_в = G^о_{вл} / F . \qquad (5.34)$$

Коэффициент влагообмена $\beta^\theta_в$, кг/(ч·м^2·°В), равен:

$$\beta^\theta_в = \frac{G^о_{вл}}{F \Delta\theta^н} . \qquad (5.35)$$

Полученная аналитическая зависимость (5.35) по определению коэффициента влагообмена $\beta^\theta_в$ однозначно характеризует требуемую интенсивность влагообмена на внутренних поверхностях наружных ограждений. Она взаимоувязывает температурно-влажностные параметры среды и наружных ограждений ($\Delta\theta^н$, °В): с объемно-планировочными и конструктивными решениями зданий (F, м^2); с технологией производства, видом животных, птиц, хранящегося сырья, режимами эксплуатации ($G^о_{вл}$, кг/ч) [39].

Рассчитанные по (5.30) значения требуемого сопротивления влагопередаче $R^{тр}_\theta$, м^2·ч·°В/кг, однозначно характеризуют и учитывают индивидуальные особенности каждого из видов неотапливаемых производственных сельскохозяйственных зданий и сооружений, их индивидуальное функциональное назначение.

5.3. Экспериментальные исследования тепловлажностных характеристик внутренних поверхностей ограждающих конструкций

Разработанная и уточненная методика нормирования тепловых и влажностных характеристик наружных ограждающих конструкций производственных сельскохозяйственных зданий на основе теории потенциала влажности в качестве основной величины, оценивающей влагозащитные свойства ограждений, включает величину нормирования удельного потока влаги через ограждение $i^{н} = \Delta\theta^{н}\beta_{в}^{\theta}$, кг/(ч·м^2). Ввиду недостаточной изученности и отсутствия необходимых в инженерных расчетах данных о величине нормируемого перепада потенциалов влажности $\Delta\theta^{н}$, ºВ, задачей проводимых экспериментальных исследований является определение значения перепада потенциалов влажности внутреннего воздуха и внутренней поверхности ограждающей конструкции здания коровника, $\Delta\theta_{Э}$, ºВ, в холодный период года.

5.3.1. Объект и метод проведения исследований

Объектом исследования является здание коровника №11 круглогодичного беспривязного содержания на 200 коров молочного направления, расположенного в с. Васильевка Ставропольского района Самарской области. Продольная ось здания ориентирована в направлении «СВ–ЮЗ», окна обращены на северо-запад и юго-восток. Здание коровника одноэтажное, прямоугольное, со стоечно-балочным каркасом, в плане однопролетное с шириной пролета 21 м, шаг стоек – 6 м, длиной 78 м. Высота помещения в коньке 4,15 м. Здание представляет единый строительный объем (6984 м^3), площадь пола – 1684 м^2. В торцах здание снабжено воротами, в продольных стенах предусмотрены окна с открывающимися фрамугами.

Наружные стены здания панельные железобетонные толщиной 0,4 м. Перекрытие бесчердачное из железобетонных сборных плит толщиной 0,22 м. Кровля выполнена из профилированной стали толщиной 0,9 мм. Полы бетонные, оконные проемы с двойным остеклением в спаренных деревянных переплетах, ворота ме-

таллические распашные.

Коровник неотапливаемый. Система вентиляции естественная: приток в холодный и переходный периоды года осуществляется через неплотности наружных ограждений, в теплый период года применяется активная аэрация через открытые оконные фрамуги, ворота; вытяжка осуществляется через светоаэрационный фонарь.

Поскольку потенциалы влажности внутреннего воздуха $\theta_в$, и внутренней поверхности ограждения $\theta_{в.п}$, ºВ, зависят от соответствующих температур и относительных влажностей, регулировать которые по определенной программе, т.е. провести активный эксперимент, невозможно, экспериментальное исследование по определению перепада потенциалов влажности представляло собой пассивный эксперимент или наблюдение. При его проведении внешние условия, в которых находился объект исследования, изменялись естественным образом, целенаправленные воздействия на объект исследования с целью изменения его состояния не организовывались.

Эксперимент проводился в холодный период года, характеризуемый среднесуточной температурой наружного воздуха равной +10°С и ниже, один раз в неделю с 15.10.2010 г. по 22.04.2011 г. Общие наблюдения за особенностями динамики формирования параметров микроклимата в коровнике осуществляются с 2009 г. по 2016 г.

В процессе исследования осуществлялись следующие замеры: температура наружного воздуха $t_н$, ºС, температура внутреннего воздуха в помещении коровника по показаниям сухого и мокрого термометров $t_с$ и $t_м$, ºС, с последующим определением относительной влажности воздуха по психрометрическим таблицам [15] и ГОСТ 8.524-85 [81], температура внутренней поверхности наружной стены $\tau_{в.п}^{НС}$, ºС, температура внутренней поверхности бесчердачного покрытия $\tau_{в.п}^{БП}$, ºС, а также температура внутренней поверхности оконного остекления $\tau_{в.п}^{О}$, ºС.

Замеры температуры и относительной влажности внутреннего воздуха производились в центре помещения коровника на высоте 1,5 м от уровня пола при

помощи аспирационного психрометра МВ-4М, температура наружного воздуха определялась вблизи здания коровника также при помощи аспирационного психрометра МВ-4М, температуры внутренних поверхностей наружной стены, покрытия и оконного остекления измерялись инфракрасным термометром DT8859, при этом количество контрольных точек составляло 25, 24 и 12 соответственно за один опыт (рисунок 5.7).

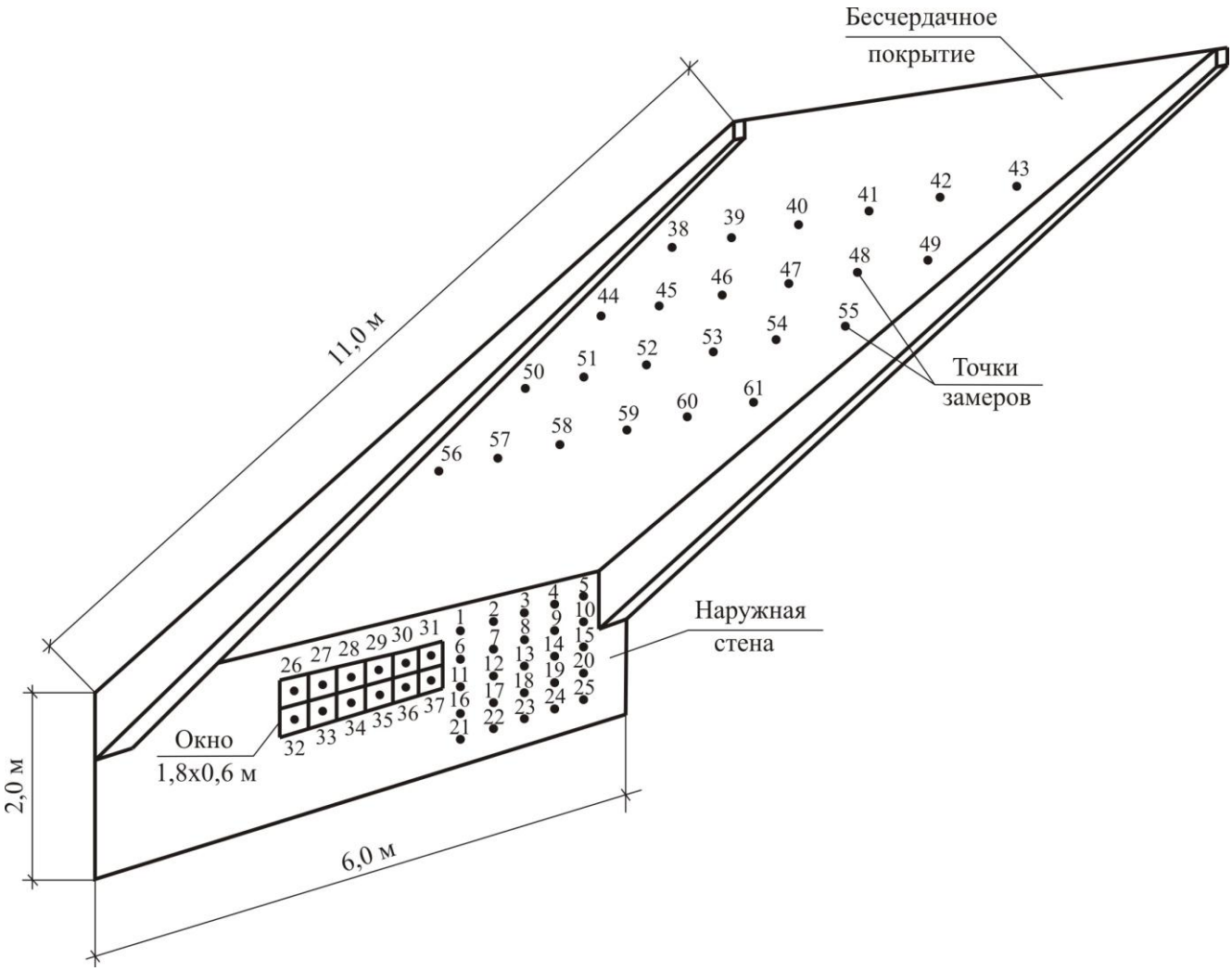


Рисунок 5.7 – Контрольные точки замеров температур внутренних поверхностей ограждающих конструкций помещения коровника

Психрометр аспирационный МВ-4М заводской номер №4662, год выпуска 1991 имеет диапазон измерения относительной влажности воздуха от 10 до 100 % при температуре окружающей среды –10…40 ºС. Диапазон измерения температуры от –10 до 51 ºС, максимальная возможная погрешность прибора ± 0,1 ºС.

Инфракрасный термометр DT8859, заводской номер №0.06023213, год выпуска 2010 предназначен для бесконтактного измерения температуры поверхностей с больших расстояний при помощи встроенного лазерного указателя. Диапазон измерения температуры от –50 до 1600 ºС, время измерения 1 с, максимальная возможная погрешность прибора ± 2 ºС.

Теория планирования эксперимента приведена в главе 2. Проверка нормальности распределения результатов измерений температуры внутренней поверхности ограждений осуществлялась по данным предварительных наблюдений за 15.10.2010 г. Нормальность распределения результатов измерений температур внутренних поверхностей наружной стены, оконного остекления и бесчердачного покрытия подтверждена расчетами: асимметрия и эксцесс эмпирического распределения температур на внутренней поверхности наружной стены $a_s = 0{,}232$, $e_k = -0{,}203$. Среднеквадратичные погрешности этих характеристик составляют $\sigma_{a_s} = 0{,}412$, $\sigma_{e_k} = 0{,}749$. Для поверхности оконного остекления $a_s = 0{,}387$, $e_k = -0{,}848$, $\sigma_{a_s} = 0{,}582$, $\sigma_{e_k} = 0{,}917$. Для бесчердачного покрытия $a_s = 0{,}057$, $e_k = -0{,}811$; $\sigma_{a_s} = 0{,}386$, $\sigma_{e_k} = 0{,}711$. Сравнение полученных величин (0,232 < 0,412; 0,203 < 0,749; 0,387 < 0,582; 0,848 < 0,917; 0,057 < 0,386; 0,811/0,711= 1,14 < 2) подтверждает, что результаты измерений подчиняются нормальному закону распределения.

В результате расчета необходимого количества измерений температуры внутренней поверхности наружной стены, температур внутренней поверхности бесчердачного покрытия и внутренней поверхности остекления оконного проема получены следующие значения необходимого количества измерений: $n_{нс}$ = 25; $n_{покр.}$ = 24; $n_{окна}$ = 12.

5.3.2. Анализ результатов натурных экспериментов

Полные результаты замеров температур наружного воздуха, внутреннего воздуха по сухому и мокрому термометрам, вычисленная на основании психрометрических таблиц [15], относительная влажность внутреннего воздуха, а также температуры внутренних поверхностей наружной стены, бесчердачного покрытия

и оконного остекления здания коровника приведены в приложении 11. В качестве примера приведены результаты замеров изучаемых параметров, полученные 08.02.2011 г. при температуре наружного воздуха $t_н$ = –8 °С (таблица 5.2).

Таблица 5.2 – Результаты натурных исследований температурно-влажностного режима коровника

Дата:	Параметры наружного и внутреннего воздуха	Температура внутренних поверхностей ограждений					
		стена		окно		покрытие	
		№ точек	$\tau^{НС}_{в.п}$, °С	№ точек	$\tau^{О}_{в.п}$, °С	№ точек	$\tau^{БП}_{в.п}$, °С
08.02.2011	$t_н$ = –8 ºС; $t_с$ = 9,4 ºС; $t_м$ = 8,7 ºС; $\varphi_в$ = 91 %.	1	5,2	26	3,4	38	10,5
		2	5,3	27	3,9	39	10,8
		3	5,0	28	4,6	40	10,9
		4	4,4	29	3,9	41	11,4
		5	4,7	30	3,5	42	11,4
		6	5,2	31	4,2	43	11,3
		7	5,2	32	3,8	44	11,3
		8	5,6	33	4,2	45	11,5
		9	6,2	34	4,1	46	11,5
		10	5,9	35	4,0	47	11,6
		11	5,7	36	3,9	48	11,6
		12	5,8	37	3,9	49	11,4
		13	6,7			50	11,2
		14	7,0			51	11,6
		15	6,7			52	11,6
		16	8,2			53	11,5
		17	7,5			54	11,5
		18	7,8			55	11,5
		19	7,8			56	11,1
		20	7,5			57	11,9
		21	7,6			58	11,9
		22	8,7			59	12,1
		23	8,9			60	12,1
		24	8,9			61	12,1
		25	8,0				

Графическое изображение результатов экспериментов приведено на рисунках 5.8…5.11. Как видно из графиков, зависимости температур внутренних поверхностей от температуры наружного воздуха $\tau^{НС}_{в.п} = f(t_н)$, $\tau^{О}_{в.п} = f(t_н)$, $\tau^{БП}_{в} = f(t_н)$ близки к линейным (невязка не превышает 7 %). Отклонения экспериментальных точек от прямой линии объясняется возможными колебаниями температур внут-

реннего воздуха в помещении коровника (раздел 5.4) [162].

Зависимости температур внутренних поверхностей могут быть описаны линейными уравнениями вида $y = kx + b$:

– для внутренних поверхностей наружных стен (рисунок 5.8):

$$\tau_{в.п}^{НС} = 0{,}57 t_н + 12{,}39; \quad (5.36)$$

– для внутренних поверхностей остекленных оконных проемов (рисунок 5.9):

$$\tau_{в.п}^{О} = 0{,}63 t_н + 10{,}36; \quad (5.37)$$

– для внутренних поверхностей бесчердачного покрытия (рисунок 5.10):

$$\tau_{в.п}^{БП} = 0{,}56 t_н + 16{,}60. \quad (5.38)$$

Зависимости (5.36…5.38) являются основными при аналитическом расчете потенциалов влажности $\theta_{в.п}$ на внутренних поверхностях теплового контура коровника.

Анализ графиков, представленных на рисунках 5.8…5.10, показывает, что наиболее низкую температуру внутренних поверхностей имеет остекление окон. Температура поверхностей наружных стен из железобетонных панелей более высокая. Наибольшую температуру имеет поверхность бесчердачного покрытия, что можно объяснить наличием «тепловой подушки» у перекрытия.

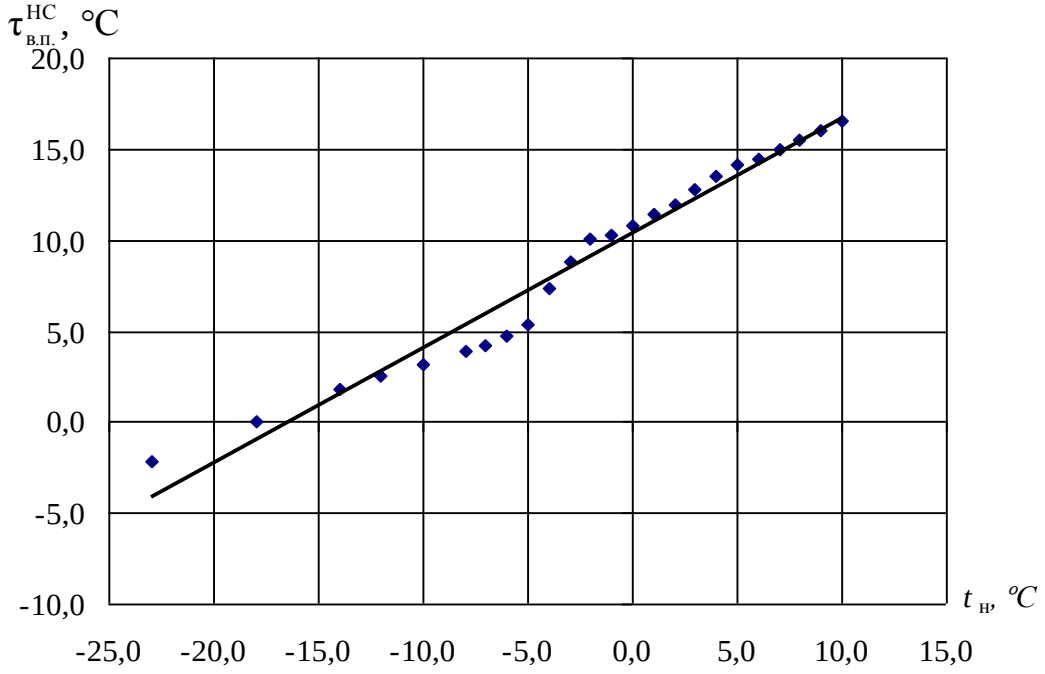


Рисунок 5.8 – Результаты измерений температуры внутренней поверхности стены здания ко-

ровника в зависимости от температуры наружного воздуха

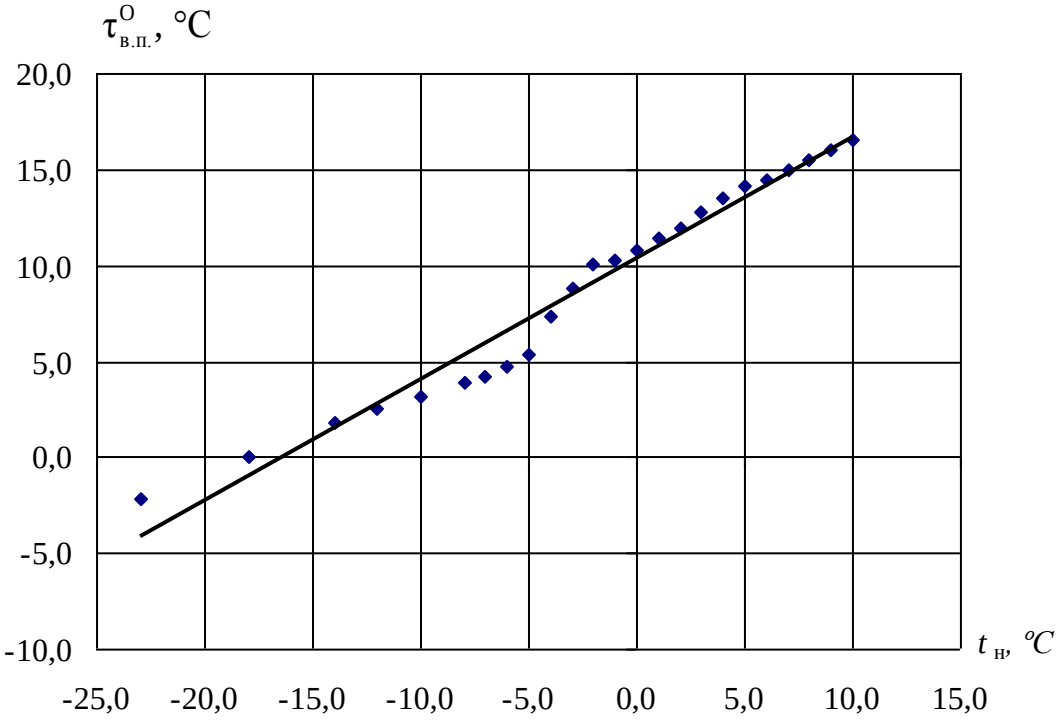


Рисунок 5.9 – Результаты измерений температуры внутренней поверхности остекления оконного проема здания коровника в зависимости от температуры наружного воздуха

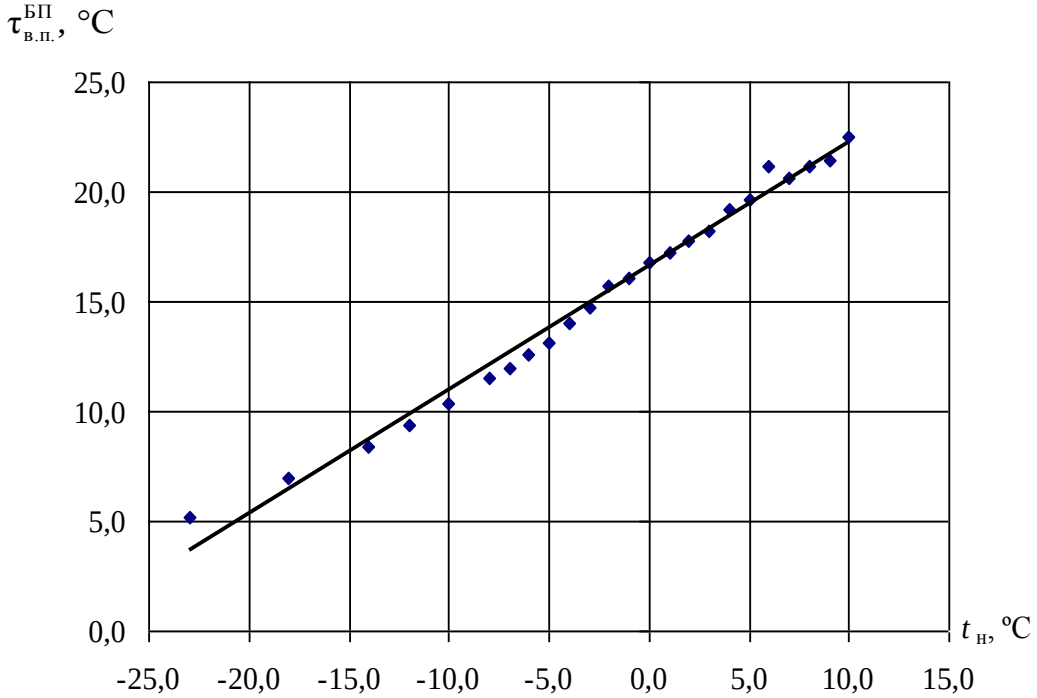


Рисунок 5.10 – Результаты измерений температуры внутренней поверхности бесчердачного покрытия здания коровника в зависимости от температуры наружного воздуха

По данным проведенного наблюдения значения относительной влажности в исследуемом коровнике колеблются в пределах 81…99 %. Графическая зависимость значений относительной влажности от температуры наружного воздуха $\varphi_в$ =

$f(t_н)$, построенная по результатам эксперимента, приведена на рисунке 5.11. Наибольшие значения $\varphi_в$ наблюдаются при температурах наружного воздуха ниже $t_н < 0$ ºС. При относительной влажности $\varphi_в > 85$ % имеет место конденсация водяных паров на стенах, покрытии. В зимний период при температуре наружного воздуха $t_н \leq -15$ ºС в помещении коровника наблюдается туман, происходит обледенение окон и ворот.

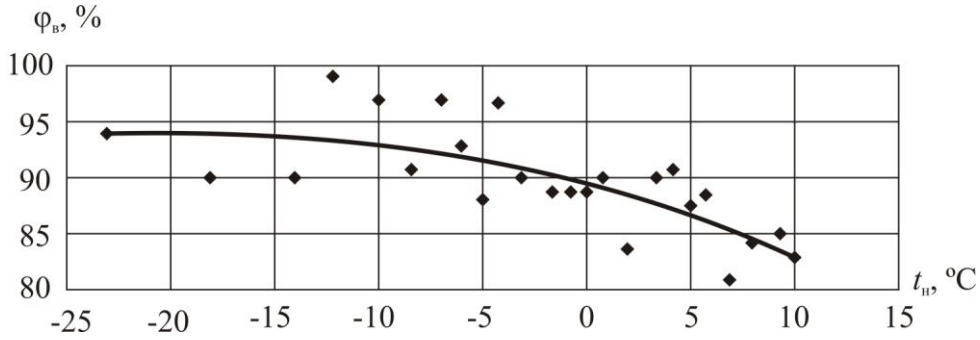


Рисунок 5.11 – Зависимость относительной влажности воздуха от температуры внутреннего воздуха в коровнике

Согласно нормам технологического проектирования максимальное значение относительной влажности внутреннего воздуха в коровнике может достигать $\varphi_в = 75$ %. Однако, как показали наблюдения, в холодный период года среднее значение относительной влажности воздуха равно $\varphi_в \approx 90$ %. Высокий уровень относительной влажности в исследуемом коровнике можно объяснить использованием бетонных конструкций без утепляющего слоя в качестве наружных ограждений. Данный материал характеризуется высокой теплопроводностью и низкой воздухопроницаемостью, что в совокупности с отсутствием естественной вентиляции (закрытые окна и ворота) при $t_н < t_н^р$ приводит к повышению относительной влажности в помещении коровника. Еще одним фактором, приводящим к увеличению величины $\varphi_в$, является отсутствие впитывающей влагу подстилки, и, как результат, наличие постоянно мокрых бетонных полов.

5.3.3. Экспериментальное определение разности потенциалов влажности

Определение экспериментальных перепадов потенциалов влажности $\Delta\theta_э$, °В, между внутренним воздухом и внутренними поверхностями наружных ограж-

дений осуществляется в следующей последовательности.

Рассчитывается потенциал влажности внутреннего воздуха $\theta_{в,}$ ºВ, по зависимостям (4.14, 4.15).

По тем же зависимостям определяется потенциал влажности внутренней поверхности ограждения $\theta_{в.п}$, ºВ, при этом относительная влажность приповерхностного слоя воздуха $\varphi_{в.п}$, %, рассчитывается из отношения упругостей водяного пара в воздухе помещений $e_в$, Па, и максимальной упругости водяных паров, соответствующих температуре внутренней поверхности ограждения $E_{в.п}$, Па:

$$\varphi_{в.п} = (e_в / E_{в.п})100\,\% . \qquad (5.39)$$

Расчет по (5.39) осуществляется, когда значения температур внутренних поверхностей наружных ограждений превышают значения температур точки росы $t_р$, ºС. В противном случае имеет место конденсация водяного пара на поверхности ограждений, и относительная влажность приповерхностного слоя воздуха принимается равной 100 %.

В качестве температур внутренних поверхностей наружных ограждений приняты средние температуры $\bar{\tau}_{в.п} = \sum \tau_{в.п} / n$, где n – количество точек замера.

Рассчитывается перепад потенциалов влажности $\Delta\theta_Э$, ºВ, по формуле:

$$\Delta\theta_Э = \theta_в - \theta_{в.п}. \qquad (5.40)$$

В таблицах 5.3 и 5.4 приведены результаты расчетов, выполненных для наружных стен и бесчердачного покрытия здания коровника. Расчеты перепада потенциалов влажности $\Delta\theta_Э$, ºВ, для внутренней поверхности остекления оконного проема не проводились, поскольку стекло является влагонепроницаемым материалом.

По результатам расчетов построены экспериментальные зависимости $\Delta\theta^{НС} = f(t_в)$ и $\Delta\theta^{БП} = f(t_в)$ для наружной стены и бесчердачного покрытия здания коровника (рисунок 5.12, 5.13). В качестве аппроксимирующих функций, наиболее вероятно показывающих расчетные точки, выбраны логарифмические, описываемые следующими уравнениями:

– для наружных стен:

$$\Delta\theta^{НС} = 1{,}23\ln(t_в) - 1{,}16; \quad (5.41)$$

– для бесчердачного покрытия:

$$\Delta\theta^{БП} = 4{,}74\ln(t_в) - 8{,}98. \quad (5.42)$$

Разброс точек на графиках 5.12 и 5.13 объясняется отклонением экспериментальных значений температуры и относительной влажности внутреннего воздуха от расчетных, а величина потенциала влажности зависит от этих двух параметров. Наличие отрицательных значений перепадов потенциалов влажности свидетельствует о направлении движения влаги внутрь помещения. Данное обстоятельство имеет место при повышенной относительной влажности ограждающих конструкций.

Таблица 5.3 – Расчет перепадов потенциалов влажности внутреннего воздуха и внутренней поверхности наружной стены здания коровника

Дата:	$t_с = t_в$, ºС	$t_м$, ºС	$\varphi_в$, %	$\theta_в$, ºВ	$\tau^{НС}_{в.п}$, ºС	$t_р$, ºС	$\varphi_{в.п}$, %	$\theta_{в.п}$, ºВ	$\Delta\theta_Э$, ºВ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
15.10.2010	15,3	13,5	81	21,6	16,5	12,0	75	20,7	0,8
23.10.2010	15,6	14,1	84	23,9	17	12,9	77	22,1	1,8
30.10.2010	13,1	11,6	83	21,6	14	10,0	78	18,4	3,2
02.11.2010	13,5	12,6	90	26,1	14,8	11,8	83	22,4	3,8
09.11.2010	14,9	13,8	88	26,1	16,2	12,9	81	22,4	3,7
17.11.2010	15,8	14,4	85	24,9	17,4	13,3	77	22,8	2,1
09.12.2010	12,1	11,2	89	24,6	12,9	10,1	84	22,3	2,3
16.12.2010	10,0	9,8	97	17,8	9,3	9,2	100	17,9	–0,1
22.12.2010	10,7	9,9	90	24,6	10,9	8,8	89	24,0	0,6
24.12.2010	9,8	9,6	97	17,6	7,0	9,0	100	15,5	2,1
12.01.2011	10,0	9,5	93	17,1	7,3	8,6	100	15,7	1,4
19.01.2011	8,4	7,7	90	15,2	4,8	6,4	100	13,9	1,3
22.01.2011	5,0	4,6	94	13,4	0,9	3,6	100	11,9	1,5
03.02.2011	8,6	8,5	99	16,7	5,4	8,0	100	14,3	2,4
08.02.2011	9,4	8,7	91	16,2	6,6	7,6	100	15,2	1,0
14.02.2011	9,0	8,8	97	16,8	6	8,2	100	14,7	2,1
24.02.2011	8,0	7,3	90	14,9	3,1	5,9	100	12,9	2,0
05.03.2011	10,0	9,1	88	16,3	8,1	7,7	100	16,4	–0,2
11.03.2011	11,5	10,6	89	24,3	11,4	9,4	89	24,5	–0,2
16.03.2011	12,6	11,8	90	25,5	13,6	10,8	84	22,6	2,9
21.03.2011	11,7	10,8	89	24,4	12,1	9,7	87	23,2	1,2
31.03.2011	14,2	13,4	91	27,5	15,2	12,7	85	24,4	3,1
09.04.2011	14,5	13,3	87	25,0	15,8	12,3	80	21,4	3,6
22.04.2011	16,1	14,5	83	23,7	17,9	13,2	74	22,6	1,1

Таблица 5.4 – Расчет перепадов потенциалов влажности внутреннего воздуха и внутренней поверхности бесчердачного покрытия здания коровника

Дата:	$t_с = t_в$, ºС	$t_м$, ºС	$\varphi_в$, %	$\theta_в$, ºВ	$\tau_{в.п}^{БП}$, ºС	$t_р$, ºС	$\varphi_{в.п}$, %	$\theta_{в.п}$, ºВ	$\Delta\theta_Э$, ºВ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
15.10.2010	15,3	13,5	81	21,6	20,6	12,0	58	20,7	1,0
23.10.2010	15,6	14,1	84	23,9	21,2	12,9	59	22,1	1,9
30.10.2010	13,1	11,6	83	21,6	17,8	10,0	61	18,3	3,3
02.11.2010	13,5	12,6	90	26,1	18,2	11,8	67	20,4	5,7
09.11.2010	14,9	13,8	88	26,1	21,2	12,9	59	22,1	4,0
17.11.2010	15,8	14,4	85	24,9	21,4	13,3	60	22,8	2,1
09.12.2010	12,1	11,2	89	24,6	16,8	10,1	66	18,4	6,2
16.12.2010	10,0	9,8	97	17,8	14,0	9,2	74	17,5	0,3
22.12.2010	10,7	9,9	90	24,6	14,7	8,8	92	28,8	–4,2
24.12.2010	9,8	9,6	97	17,6	12,0	9,0	84	21,7	–4,1
12.01.2011	10,1	9,6	93	26,1	12,6	8,6	100	32,6	–6,5
19.01.2011	8,4	7,7	90	15,2	8,4	6,4	100	16,7	–1,4
22.01.2011	5,0	4,6	94	13,4	5,2	3,6	100	14,2	–0,7
03.02.2011	8,6	8,5	99	16,7	9,4	8,0	94	16,6	0,1
08.02.2011	9,4	8,7	91	16,2	11,5	7,6	79	16,1	0,1
14.02.2011	9,0	8,8	97	16,8	10,4	8,2	88	23,7	–6,9
24.02.2011	8,0	7,3	90	14,9	7,0	5,9	96	15,0	–0,1
05.03.2011	10,0	9,1	88	16,3	13,1	7,7	72	16,1	0,2
11.03.2011	11,5	10,6	89	24,3	15,7	9,4	68	17,7	6,6
16.03.2011	12,6	11,8	90	25,5	17,2	10,8	67	19,2	6,2
21.03.2011	11,7	10,8	89	24,4	16,1	9,7	67	17,9	6,5
31.03.2011	14,2	13,4	91	27,5	19,2	12,7	66	21,8	5,8
09.04.2011	14,5	13,3	87	25,0	19,6	12,3	63	21,1	3,8
22.04.2011	16,1	14,5	83	23,7	22,5	13,2	56	22,6	1,1

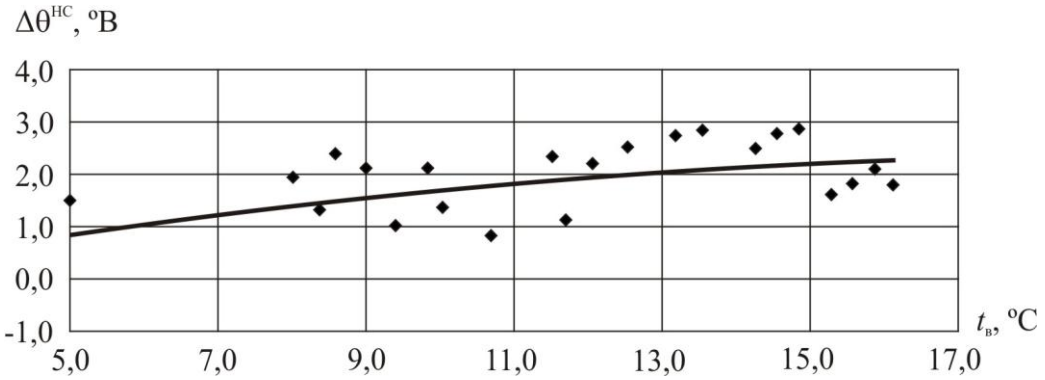


Рисунок 5.12 – Зависимость перепада потенциалов влажности внутреннего воздуха и внутренней поверхности наружной стены здания коровника от температуры внутреннего воздуха

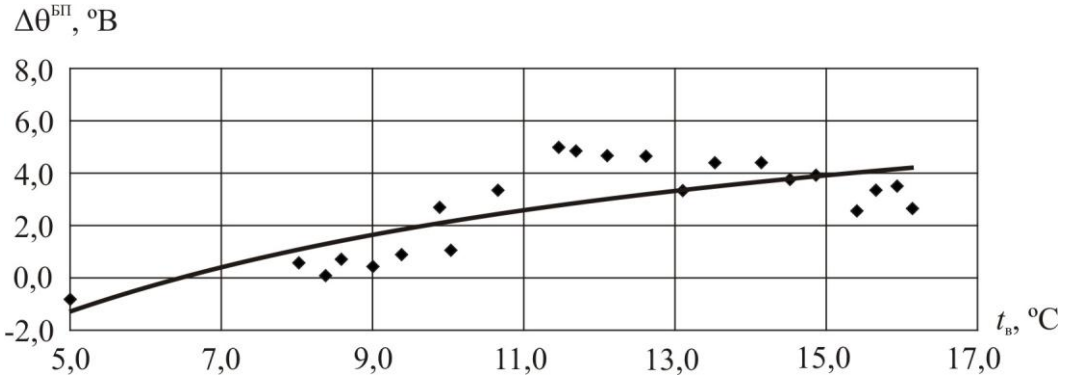


Рисунок 5.13 – Зависимость перепада потенциалов влажности внутреннего воздуха и внутренней поверхности бесчердачного покрытия здания коровника от температуры внутреннего воздуха

Графические зависимости $\Delta\theta^{НС} = f(t_в)$ и $\Delta\theta^{БП} = f(t_в)$, соответствующие уравнениям (5.41) и (5.42), дают возможность аналитического определения осредненных значений перепадов потенциалов влажности [159, 162].

Таким образом, экспериментально получена вторая недостающая величина для нормирования сопротивления влагопередаче – нормативное значение перепада потенциалов влажности $\Delta\theta_Э = \Delta\theta^н$, °В, между внутренним воздухом и внутренней поверхностью ограждающих конструкций зданий (коровников) при определении удельного потока влаги через наружные ограждения $i^н = \Delta\theta^н \beta_в^\theta$, входящего в зависимость (5.30).

5.4. Расчетные параметры наружного и внутреннего воздуха

Для практического применения разработанной методики нормирования сопротивления влагопередаче наружных ограждающих конструкций неотапливаемых сельскохозяйственных зданий на основе теории потенциала влажности необходимо иметь расчетные параметры наружного и внутреннего воздуха в шкале потенциала влажности.

В качестве характеристики *наружного климата* принимается потенциал влажности наружного воздуха $\theta_н$, °В. Выбор параметров наружного климата для расчета теплофизических характеристик наружных ограждающих конструкций должен проводиться с учетом требований обеспеченности расчетных условий. В качестве показателя, позволяющего оценить вероятность отклонения значения потенциала влажности наружного воздуха $\theta_н$ от расчетного, используется традици-

онный для строительной теплофизики коэффициент обеспеченности $К_{об}$, определяемый по формуле (3.23).

Для получения расчетного значения потенциала влажности наружного воздуха $\theta_н$ при разных коэффициентах обеспеченности $К_{об}$ за ряд случаев были приняты все сутки отопительных периодов с 1997 по 2007 гг.. по данным метеорологических наблюдений Тольяттинской специализированной гидрометеорологической обсерватории. Количество отсчетов по указанному сроку наблюдения N = 2150. Расчетные условия для холодного периода года должны быть определены наиболее невыгодным сочетанием климатических параметров. Поэтому за расчетный случай были приняты самые холодные сутки ($t_н$ = –31 °С; $\varphi_н$ = 73 %) с наименьшим значением потенциала влажности наружного воздуха $\theta_н$ = 7,1 ºВ, рассчитанным по (4.14, 4.15), которому соответствует величина коэффициента обеспеченности равная $К_{об}$ = 1,0.

Значения потенциалов влажности наружного воздуха были расположены в возрастающий статистический ряд. На рисунке 5.14 приведено графическое изображение статистического ряда для принятого срока наблюдения. На основе полученной графической зависимости представляется возможным определить величину расчетного потенциала влажности наружного воздуха при заданном значении коэффициента обеспеченности $К_{об}$.

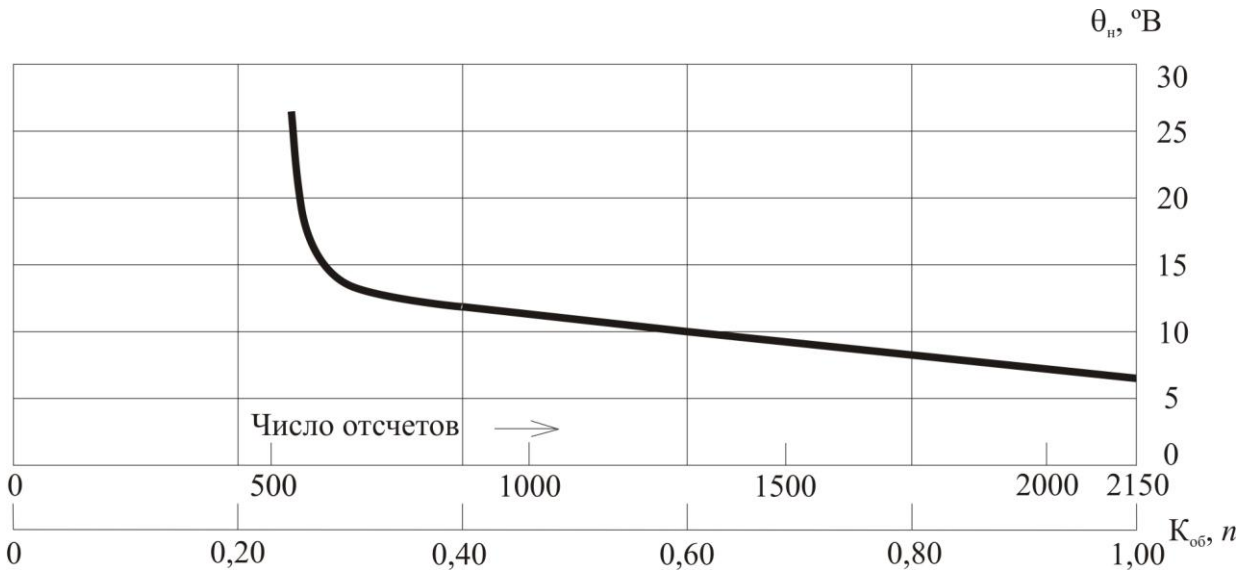


Рисунок 5.14 – Статистический ряд среднесуточных значений потенциала влажности (отопительный период)

За расчетный параметр *внутреннего воздуха* принимается значение потенциала влажности $\theta_в$, ºВ. Он является функцией температуры и относительной влажности воздуха, значение которых для помещений сельскохозяйственных зданий регламентируются нормами технологического проектирования [201, 202, 203, 204, 205, 206, 207, 208]. По зависимостям (4.14, 4.15) определяются расчетные значения $\theta_в$. В таблице 5.5 приведены нормируемые значения потенциалов влажности внутреннего воздуха для сельскохозяйственных помещений различного функционального назначения.

Полученные в натурных условиях значения температур, относительных влажностей и потенциалов влажности воздуха в рабочей зоне коровника в с. Васильевка приведены на рисунке 5.15.

Таблица 5.5 – Нормируемые параметры внутреннего воздуха для сельскохозяйственных помещений

№ п/п	Наименование помещений	Расчетная температура $t_в$, °С	Относительная влажность воздуха $\varphi_в$, %	Потенциал влажности $\theta_в$, °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

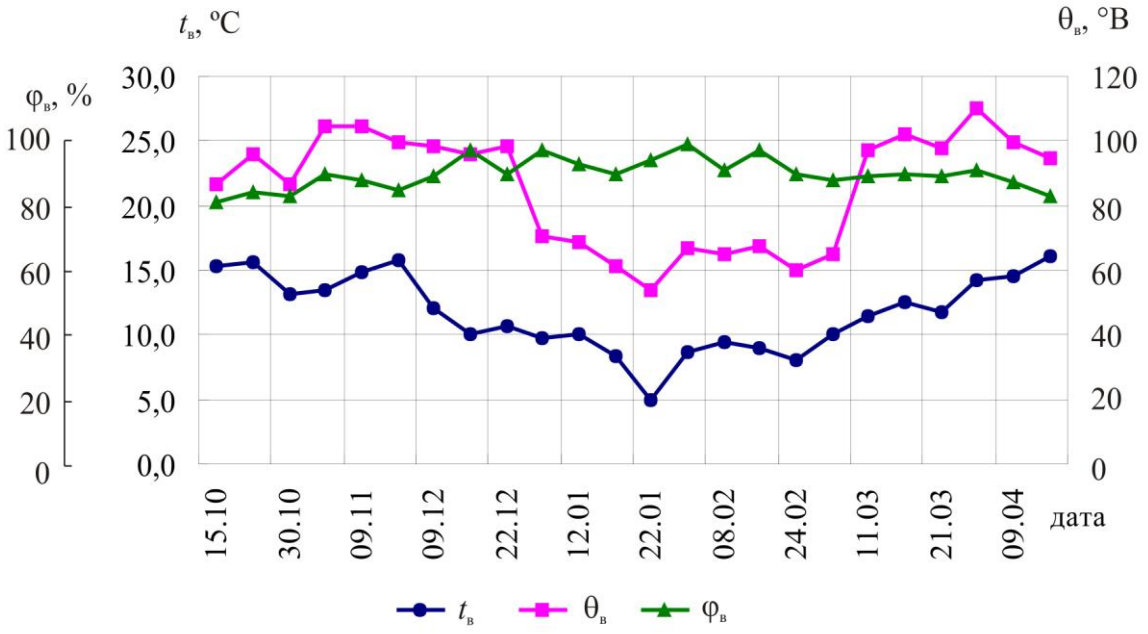


Рисунок 5.15 – Ход температур, относительных влажностей и потенциалов влажностей в рабочей зоне коровника

5.5. Методика расчета теплотехнических характеристик и влажностного режима наружных ограждений неотапливаемых сельскохозяйственных зданий

Общие исходные данные:

1) объект расчета наружных ограждающих конструкций;
2) физиологические характеристики животных;
3) объемно-планировочные решения объекта;
4) конструкции наружных ограждений: наружные стены, покрытие, окна, двери (ворота), полы;
5) климатические характеристики района строительства [260]:

– средняя температура наиболее холодной пятидневки $t_н$, °С ($К_{об}$ = 0,92);

– средняя относительная влажность воздуха наиболее холодного месяца $\varphi_н$, %;

– зона влажности района строительства (влажная, нормальная, сухая);

6) параметры внутреннего воздуха [201, 202, 203, 204, 205, 206, 207, 208, 261]:

– расчетная температура в помещении $t_в$, °С;

– относительная влажность воздуха в рабочей зоне помещения $\varphi_в$, %;

– влажностный режим помещения (сухой, нормальный, влажный, мокрый);

– условия эксплуатации ограждающих конструкций (А, Б, Б*).

Теплотехнический расчет наружных стен, покрытий, ворот.

Рассчитывается требуемое сопротивление теплопередаче наружных стен неотапливаемого сельскохозяйственного здания $R_0^{тр}$ при 100 % заполняемости по (1.8). В животноводческих и птицеводческих помещениях явные физиологические тепловыделения $Q_б$ следует уменьшить на величину потерь теплоты через наружные ограждения с заранее известными площадями и сопротивлениями теплопередаче (окна, двери, ворота). Соответственно, на сумму площадей окон, дверей, ворот следует уменьшать площадь F надземных стен и покрытий в (1.8).

Сопротивление теплопередаче и толщина утеплителя наружных стен находится по (1.6) при подстановке вместо R_0 величины $R_0^{тр}$, полученной по формуле (1.8). Действительное сопротивление теплопередаче стены $R_{0ст}^{д}$ из штучного материала принимается с учетом кратности действительных толщин утеплителя. Сопротивление теплопередаче покрытия неотапливаемых сооружений находится из (1.13).

Задаются конструкцией наружных стен и покрытий, по (1.6) находится толщина утеплителя каждого элемента, с учетом выбранного способа защиты утеплителя от атмосферной влаги.

Конструкции окон являются заранее фиксированными и их сопротивление теплопередаче $R_{0\,ок}$ принимается в соответствии с действующими нормативными документами.

Ворота помещения должны быть утеплены до величины сопротивления теплопередаче $R_{0\,вор}$, при котором выполняется условие $\tau_{в.п} \geq t_р$.

Удовлетворение требованиям теплового баланса неотапливаемых помещений. Находим по (1.25) условную температуру наружного воздуха $t_н^р$, до которой при расчетной (100 %) заполняемости помещения не требуется нагрев минимального количества приточного воздуха, определяемого по (1.23). Проводим сопоставление температур $t_н^р$ со средней температурой самого холодного месяца (янва-

ря) $t_{н}^{I}$. Делается вывод об отсутствии или необходимости искусственного подогрева подаваемого в помещение наружного воздуха.

Аналогичные расчеты и анализ теплового режима проводим при 50 % (от расчетной) заполняемости помещения. Определяется условная температура наружного воздуха $t_{н.0,5}^{р}$:

$$t_{н.0,5}^{р} = t_{в} - \frac{0,5Q_{б}^{ж}}{F/R_{0}^{тр} + c_{в}\rho_{в}L_{н.min}}. \qquad (5.43)$$

Величина $t_{н.0,5}^{р}$ сопоставляется со средней температурой января $t_{н}^{I}$ и выявляется минимальное количество голов КРС, птиц, хранящегося сырья, при которых помещение может эксплуатироваться без подачи тепловой энергии извне в холодный период года или рассчитывается мощность систем резервного отопления.

Влажностный расчет наружных стен, покрытий, ворот.

Наружные стены.

Условия эксплуатации материальных слоев Б* (раздел 5.1.2). По зависимостям (4.14, 4.15) находятся значения потенциалов влажности внутреннего $\theta_{в}$ и наружного $\theta_{н}$ воздуха, °В.

По графику 5.14 или зависимости (5.41) находится перепад потенциалов влажности внутреннего воздуха и внутренней поверхности наружной стены $\Delta\theta^{НС}$, °В.

По (5.35) с учетом объемно-планировочных решений помещений и общих физиологических, биологических и технологических влаговыделений рассчитывается коэффициент влагообмена $\beta_{в}^{\theta}$, кг/(ч·м^{2}·°В).

По (5.30) вычисляется нормируемое значение сопротивления влагопередаче $R_{\theta}^{тр}$, м^{2}·ч·°В/кг.

Определяются значения коэффициентов влагопроводности χ, кг/(м·ч·°В), для однослойной конструкции стены по (5.21). Для многослойной стены графоаналитическим методом находятся значения потенциалов влажности θ, °В, в толще конструкции, а также осуществляется расчет величин парциальных давлений e, Па, на границах слоев наружной стены (раздел 5.1.1). По полученным значени-

ям парциальных давлений и потенциалов влажности в каждом из сечений рассчитываются коэффициенты влагопроводности χ, кг/(м·ч·°В), материалов каждого слоя конструкции стены по (5.25…5.27).

Находятся приведенные сопротивления влагопередаче $R_{\theta,0}$, м^2·ч·°В/кг, для однослойной или многослойной стен по (5.17).

Теплофизический расчет теплового контура неотапливаемых сельскохозяйственных зданий считается выполненным при соблюдении теплотехнических ($R_0 \geq R_0^{\text{тр}}$) и влажностных ($R_{\theta,0} \leq R_\theta^{\text{тр}}$) условий. Выполнение первого требования заложено в основу теплотехнических расчетов и всегда выполняется. Задача состоит в выполнении второго обязательного требования по влажностному режиму обеспечивающего удаление через наружные ограждения (стены, покрытие) излишек влаги в атмосферу.

Аналогично проводятся теплотехнический расчет и расчет влажностного режима бесчердачного покрытия.

Приведенная методика расчетов теплофизических показателей наружных ограждений неотапливаемых производственных сельскохозяйственных зданий на основе понятия полного термодинамического потенциала переноса (потенциала влажности) в полном объеме характеризует физические явления переноса теплоты и влаги через ограждающие конструкции. Она однозначно определяет и характеризует правильность инженерных решений по конструктивным особенностям наружных ограждений и их эксплуатационные показатели в процессе круглогодичной эксплуатации помещений.

5.6. Выводы по главе 5

1. Показано, что аналогия процессов теплопроводности и влагопроводности дает возможность выявить динамику тепломассопереноса в наружных ограждающих конструкциях на основе разности полных термодинамических потенциалов фаз (потенциалов влажности). Принятие за основу переноса влаги разности потенциалов влажности, как обобщающей силы переноса теплоты и влаги, позволяют рассматривать как стационарные, так и нестационарные процессы в ограждающих конструкциях.

2. Обоснована и разработана аналитическая зависимость (5.21) определения коэффициента влагопроводности любых строительных материалов в шкале потенциала влажности.

3. Предложен графо-аналитический метод определения значений потенциала влажности θ в толще многослойных ограждающих конструкций, позволяющий выявить интенсивность влагопереноса в наружных ограждениях.

4. Установлены ограничения по расчету сопротивления влагопередаче через наружные ограждения связанные с функциональным назначением помещений и способами поддержания оптимальных и допустимых параметров микроклимата.

5. Разработана методика нормирования величины сопротивления влагопередаче наружных ограждений основанная на понятии потенциала влажности. Нормирование теплофизических характеристик наружных ограждений неотапливаемых производственных сельскохозяйственных зданий по теплотехническим требованиям ($R_0^{тр}$) и по требованиям сопротивления влагопередаче ($R_\theta^{тр}$) 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 $R_\theta^{тр}$ не должно приводить к снижению теплотехнических характеристик

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

6. Полученная аналитическая зависимость (5.35) по определению коэффициента влагообмена $\beta_{в}^{\theta}$ позволяет учесть при расчете требуемого сопротивления влагопередаче $R_{\theta}^{тр}$ температурно-влажностные параметры среды и наружных ограждений ($\Delta\theta^{н}$, °В), объемно-планировочные и конструктивные решения зданий (F, м^2) , технологию производства и режимы эксплуатации ($G_{вл}^{о}$, кг/ч).

7. Натурно подтверждены аналитические зависимости по определению перепада потенциалов влажности внутреннего воздуха и внутренних поверхностей наружных ограждений (5.41) и (5.42), которые позволяют применять зависимость (5.30) для практических расчетов.

8. Разработана инженерная методика расчета теплотехнических характеристик и влажностного режима наружных ограждений неотапливаемых сельскохозяйственных зданий.

Глава 6. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ МИКРОКЛИМАТА

6.1. Технико-экономическое обоснование применения механической вентиляции в многоэтажных жилых домах

Согласно разработанной режимной карте работы комбинированной естественно-механической вентиляции применение механической вентиляции в холодный период года экономически целесообразно в том случае, если затраты на нагрев избыточного (по сравнению с нормируемым) объема воздуха превышают затраты на привод вентилятора:

$$\text{с}_\text{т} Q_\text{инф} \geq Q^\text{н}_\text{инф} \text{с}_\text{т} + N\text{с}_\text{э}, \tag{6.1}$$

где $\text{с}_\text{т}$ – затраты на тепловую энергию, руб./Гкал; $\text{с}_\text{э}$ – затраты на электрическую энергию, руб./кВт·ч; N – потребляемая мощность вентилятора за час, кВт·ч.

Затраты теплоты на нагрев инфильтрирующегося воздуха определяются по формуле:

$$Q_\text{инф} = 0{,}28 \cdot L_\text{уд} \cdot \rho \cdot c \cdot (t_\text{в} - t_\text{н}), \tag{6.2}$$

где $L_\text{уд}$ – расход удаляемого воздуха м^3/ч; ρ – плотность воздуха в помещении, кг/м^3; $t_\text{в}$, $t_\text{н}$ – расчетные температуры воздуха, ˚С, соответственно в помещении и наружного воздуха в холодный период года.

Разница затрат теплоты на нагрев фактического объема инфильтрирующегося воздуха и нормируемого объема составляет:

$$\Delta Q = Q_\text{инф} - Q^{н}_{инф} = 0{,}28 \rho c \Delta L (t_\text{в} - t_\text{н}), \tag{6.3}$$

где ΔL – превышение фактического воздухообмена относительно нормируемого, м^3/ч.

Подставив (6.3) в неравенство (6.1) получим:

$$\text{с}_\text{т} (Q^\text{н}_\text{инф} + \Delta Q) \geq Q^\text{н}_\text{инф} \text{с}_\text{т} + N\text{с}_\text{э}.$$

В конечном виде имеем:

$$\Delta Q \geq \frac{N \cdot \text{с}_\text{э}}{\text{с}_\text{т}}. \tag{6.4}$$

Затраты тепловой энергии на нагрев приточного воздуха в круглогодичном цикле эксплуатации описываются интегральной кривой, представленной на ри-

сунке 6.1. По расчетной величине $\Delta Q^{расч}$, Вт, определяют температуру наружного воздуха, начиная с которой целесообразно применение механической вентиляции $t_н^{расч}$, °С. Суммарный за весь отопительный период перерасход тепловой энергии на нагрев избыточного, по сравнению с нормируемым, инфильтрирующегося воздуха, $\Delta Q_{год}$, определяется площадью заштрихованной фигуры АВС. Учитывая, что изменение годовой тепловой нагрузки представляет собой функцию $Q_{год} = f(\tau)$, то $\Delta Q_{год}$ определяется по формуле:

$$\Delta Q_{год} = \int_0^{\tau_0} f(\tau)d\tau - \Delta Q \cdot \tau_0, \qquad (6.5)$$

где τ_0 – количество часов отопительного периода, с температурой ниже $t_н^{расч}$, ч, принимаемое по [192].

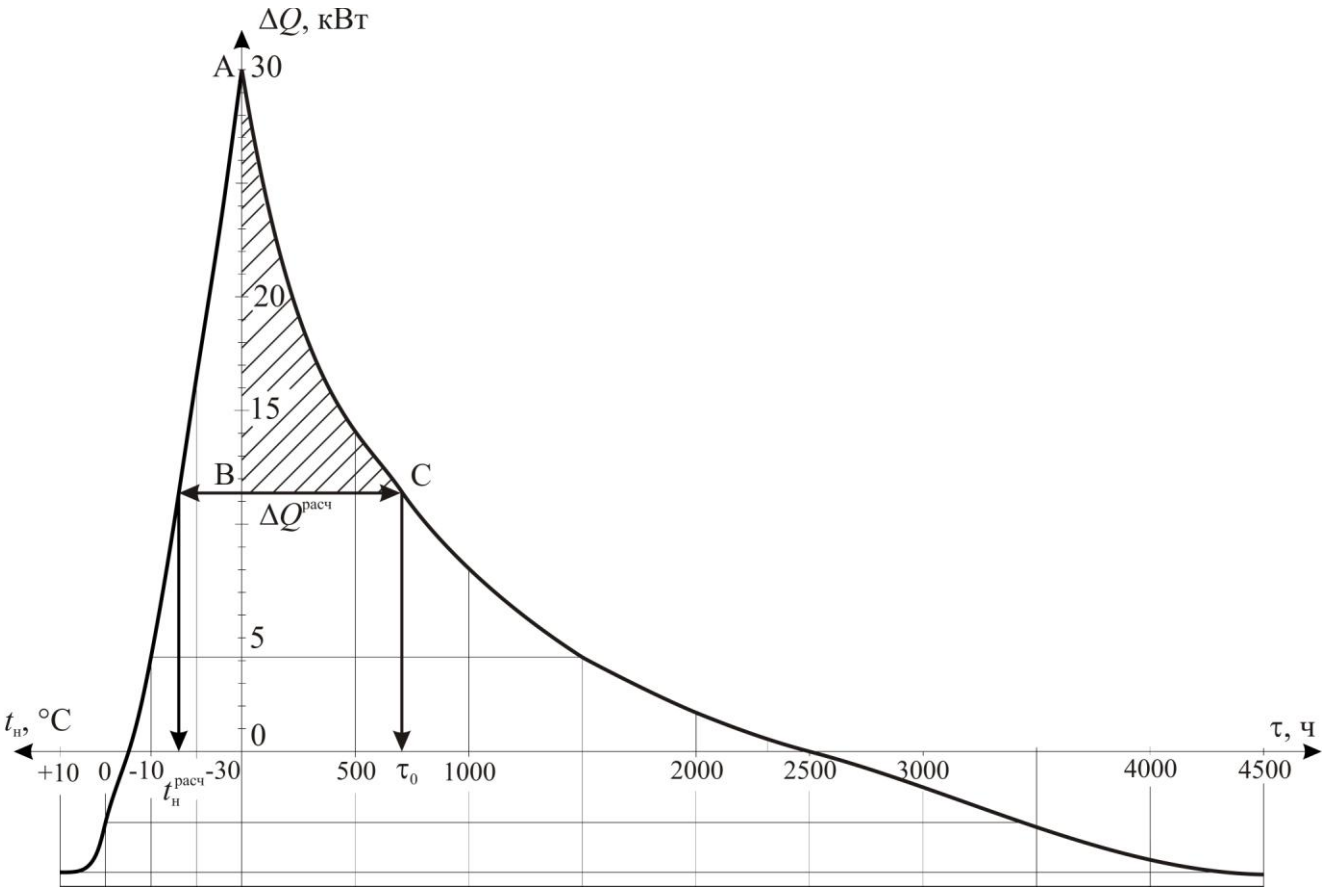


Рисунок 6.1 – Интегральная кривая затрат теплоты на нагрев приточного инфильтрующегося воздуха

Результаты расчета технико-экономических показателей от внедрения комбинированной естественно-механической вентиляции в типовых многоэтажных жилых домах представлены в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Технико-экономические показатели работы комбинированной естественно-механической вентиляции

Показатель	Самарская область	Нижегородская область
Температура начала вентилирования, $t_{н}^{расч}$,°С	-10	-10
Продолжительность использования механической вентиляции за отопительный период, τ_0, ч	1475	1356
Экономия тепловой энергии ΔQ, Гкал/секция	17,76	16,19
Стоимость тепловой энергии, руб./Гкал	1693	1029
Стоимость электрической энергии, руб/кВт·ч	3,44	3,32
Объем жилого фонда, тыс. м^2	980	2060
Расчетный экономический эффект, млн.руб/год	18,19	21,18

Внедрение разработанных режимных карт работы комбинированной естественно-механической вентиляции было осуществлено в проектную деятельность ООО «Проектпромвентиляция» (г. Нижний Новгород) и ООО «Смарт-Хаус» (г. Тольятти) и использовано при разработке проектно-сметной документации по реализации региональных программ капитального ремонта. Расчетный годовой экономический эффект составил 39,37 млн.руб.

6.2. Показатели эффективности систем обеспечения параметров микроклимата при сушке и хранении биологически активного сырья

6.2.1. Коэффициент обеспеченности сохранности травы и зерна

Ухудшение качества продукции во времени является аддитивным и кумулятивным. Наиболее полно оно оценивается обобщенными показателями: коэффициентом сохранности питательных веществ в процессе сушки $К_{об.с.}$ и коэффициентом обеспеченности всхожести зерна $К_{об.в.з.}$.

Коэффициент обеспеченности сохранности питательных веществ в процессе сушки травы/зерна $К_{об.с.}$ равен:

$$К_{об.с.} = 0{,}9 \cdot К_{об.к.тр} К_{об.м}, \qquad (6.6)$$

где 0,9 – коэффициент, учитывающий потерю питательных веществ при сушке

травы из-за дыхания; $К_{об.к.}$, $К_{об.м}$ – соответственно коэффициенты обеспеченности качества скошенной травы и параметров воздуха в период сушки.

Так как качество скошенной травы одного ботанического состава в оптимальные сроки заготовки не влияет на сохранность питательных веществ в заготовляемом сене, для инженерных расчетов можно принять $К_{об.к.тр.}$=1,0.

Коэффициент обеспеченности сохранности всхожести в процессе сушки зерна $К_{об.с.з}$ определяется по формуле:

$$К_{об.в.з.} = 0{,}95 \cdot К_{об.к.з.} К_{об.м}, \qquad (6.7)$$

где 0,95 – коэффициент, учитывающий снижение всхожести при сушке зерна из-за дыхания; $К_{об.к.з}$ – коэффициент обеспеченности качества зерна.

Качество семенного зерна максимально при проведении уборочных работ в период полной зрелости зерновых культур и не зависит от сорта, поэтому для инженерных расчетов можно принять $К_{об.к.з}$ = 1.

Величина коэффициента $К_{об.м}$ зависит от технологии заготовки сена/зерна и от климатических условий данной местности. Численные значения $К_{об.м}$, полученные в результате обобщения отечественных и зарубежных практических данных и собственных исследований автора, приведены в таблице 6.2.

Таблица 6.2 – Коэффициенты обеспеченности параметров воздуха в период сушки

Технология заготовки	$К_{об.}$
Естественная сушка в полевых условиях	0,50…0,70
Сушка неподогретым атмосферным воздухом – в условиях Самарской области – в условиях Нижегородской области	 0,9 0,8
Сушка воздухом, подогретым за счет солнечной энергии – в условиях Самарской области – в условиях Нижегородской области	 0,99 0,85
Сушка перегретым воздухом	0,99

6.2.2. Экономическая эффективность использования систем солнечного подогрева

Решение проблемы энергосбережения в технологиях послеуборочной обработки сельскохозяйственной продукции заключается в отказе от искусственного

подогрева воздуха и выборе оптимальной производительности САВ, что приводит к сокращению времени работы вентустановок и общей продолжительности сушки.

Удельные эксплуатационные затраты при работе сушильных установок $С_в$, руб/т, определяются по формуле:

$$С_в = Э_т + Э_{эл} + В + Р_т + Р_к + З, \qquad (6.8)$$

где $Э_т$ – удельные затраты на топливо или теплоту для подогрева воздуха, руб/т; $Э_{эл}$ – то же на электроэнергию, руб/т.

Остальные удельные затраты на восстановление основных фондов (В), текущий и капитальный ремонт ($Р_т + Р_к$), заработную плату (З) считаем равными для рассматриваемых систем ввиду сопоставимости капитальных вложений в установки САВ, работающих на подогретом и неподогретом воздухе.

Удельные годовые затраты на привод вентилятора равны:

$$Э_{эл}^{в} = ПN_в\tau / G_{мат}, \qquad (6.9)$$

где П – стоимость электроэнергии, П = 3 руб/кВт·ч (средняя по Приволжскому региону); $N_в$ – мощность электродвигателя, кВт.

Использование солнечных теплогенераторов позволяет не только сократить расходы энергии на привод вентиляторов, но и снизить общегодовое потребление топлива. Экологический эффект от использования возобновляемых источников энергии не рассчитывался [55].

Количество сэкономленного топлива, т.у.т./т:

$$G_т = \frac{L_в \cdot \rho_в \cdot c_в \cdot \Delta t \cdot \tau}{Q_н \cdot \eta_{уст} \cdot G_{мат}}, \qquad (6.10)$$

где $Q_н$ – низшая теплотворная способность условного топлива, принимаемая $Q_н$ = 8,2 МВт/т.у.т. = 29500 кДж/кг; $\eta_{уст}$ = 0,8 – КПД топливоиспользующей установки.

Удельные затраты на топлива определяются по формуле:

$$Э_т = П_т \cdot G_т, \qquad (6.11)$$

где $П_т$ = 10000 руб/т.у.т. – стоимость условного топлива.

Экономическая эффективность за счет повышения коэффициента обеспе-

ченности сохранности питательных веществ в процессе сушки составляет:

$$\Delta C_с = mC_{КЕ}\Delta К_{об.с.з}, \quad (6.12)$$

где m – содержание кормовых единиц (КЕ) в 1 кг продукта (среднее значение по Самарской области: m = 0,5 КЕ – в 1 кг сена, m = 1,2 КЕ – в 1 кг зерна); $C_{КЕ}$ – себестоимость одной КЕ, $C_{КЕ}$ = 11 руб. (в ценах 2015 г.).

Экономическая эффективность за счет повышения коэффициента обеспеченности сохранности всхожести зерна определяется по формуле:

$$\Delta C_з = C_{сем..з}\Delta К_{об.с.з.}, \quad (6.13)$$

где $C_{сем.з.}$ – стоимость семенного зерна, $C_{сем.з.}$= 9000 руб/т.

Результаты расчета сведены в таблицу 6.3.

Таблица 6.3 – Технико-экономические показатели сушки растительного сырья неподогретым и подогретым воздухом (в ценах 2015 г.) (по данным примера 1)

Показатели	Неподогретый воздух	Подогретый на 5 °С за счет сжигания топлива	Подогретый в солнечном коллекторе на 5 °С
Интенсивность удаления влаги W, кг/ч	276,5	315,3	315,3
Продолжительность сушки τ, ч/год	70,2	61,5	61,5
Затраты на привод вентилятора $Э_{эл.в.}$, руб/(т·год)	92,7	81,3	81,3
Удельный расход топлива $G_т$, т.у.т./год	-	0,025	-
Затраты на топливо $Э_т$, руб/(т·год)	-	250	-
Общие удельные затраты $C_в$, руб/(т·год)	92,7	331,3	81,3
Коэффициент обеспеченности сохранности питательных веществ $К_{об.с.тр}$	0,81	0,89	0,89
Коэффициент обеспеченности сохранности всхожести зерна $К_{об.с.з.}$	0,86	0,94	0,94
Повышение обеспеченности сохранности питательных веществ $\Delta К_{об.с.тр}$.	-	0,08	0,08
Повышение обеспеченности сохранности всхожести $\Delta К_{об.с.з.}$	-	0,09	0,09
Экономический эффект за счет повышения Коб.с.тр., $\Delta C_с$, руб/т трава зерно	 - -	 440 1056	 440 1056
Экономический эффект за счет повышения Коб.с.з., $\Delta C_з$, руб/т	-	810	810

Разработанные инженерные методики расчета режимов работы систем активной вентиляции при заготовке грубых кормов и сушке зерна внедрены в практическую деятельность сельскохозяйственных предприятий Самарской области (ООО СХП «Олимп-Агро»,ООО Агрофирма «Волжанин», ОАО «Подстепкинское»). Достигнутый экономический эффект составил 4,41 млн. руб/год в ценах 2016 года.

6.2.3. Коэффициент обеспеченности сохранности СРС

Повышение показателя энергоэффективности хранилищ биологически активной продукции и сохранность продукции зависит от степени совершенства систем подготовки воздуха и правильного определения времени работы САВ. Время работы системы вентиляции должно быть минимальным и при этом достаточным для ассимиляции тепла и влаги выделяющейся в процессе дыхания хранящейся продукции. Экономическая эффективность процесса хранения продукции должна рассматриваться с учетом показателя сохранности продукции и энергоемкости систем микроклимата. Энергоемкость является показателем длительного действия и имеет тенденцию к увеличению [56, 140, 200].

Сохранность биологически активной продукции наиболее полно характеризуется коэффициентом эффективности хранения $\eta_х$, который включает в себя коэффициент эффективности микроклимата $\eta_м$ коэффициент эффективности эксплуатации $\eta_э$ и определяется по (1.1).

Коэффициент эффективности микроклимата $\eta_м$ включает в себя коэффициент эффективности поддержания параметров микроклимата заложенный на этапе проектирования хранилища $\eta_м^А$ и коэффициент эффективности работы системы вентиляции $\eta_м^Е$.

Коэффициент эффективности эксплуатации $\eta_э$ складывается из характера распределения приточного воздуха в хранилище и микроклимата хранилища меняющегося в зависимости от загрузки хранилища сырьем.

Коэффициент эффективности работы системы вентиляции хранилища $\eta_{м}^{E}$ характеризуется зависимостью (1.2).

Коэффициент сохранности хранящейся продукции $\eta_{м}^{о}$ учитывает мощность воздушного отопления *N*, кВт, и массу хранящегося сырья $G_{р}$, т:

$$\eta_{м}^{о} = 1 - 2{,}05N / G_{р} \qquad (6.14)$$

Коэффициент $\eta_{м}^{в}$ характеризует потери сырья, связанные с дополнительным нагревом подаваемого воздуха вентиляторами и равен $\eta_{м}^{в}$ = 0,999, 0,9995 для радиальных и центробежных вентустановок соответственно.

Отличие относительной влажности воздуха подаваемого в хранилище $\varphi_{в.о}$ от равновесной $\varphi_{р}$ учитывается коэффициентом сохранности сырья:

$$\eta_{м}^{\varphi} = 1 - 10^{-3}(\varphi_{р} - \varphi_{в.о}) / 6 \qquad (6.15)$$

Коэффициент сохранности продукции учитывает оптимальность воздухообмена в хранилище:

$$\eta_{м}^{L} = 1 - 0{,}74 \cdot 10^{-2} n, \qquad (6.16)$$

где n – коэффициент воздухообмена, $n = L_{v.опт} / L_{v}$.

Коэффициент эксплуатации системы вентиляции при хранении рассчитывается по выражению (1.3).

Коэффициент неравномерности подачи воздуха в хранилище $\eta_{э}^{р}$ учитывает увеличение времени работы системы вентиляции от $\tau_{г.о}$ до $\tau_{г}$ ($\alpha = \tau_{г} / \tau_{г.о}$) для расчетной ассимиляции тепла и влаги:

$$\eta_{э}^{р} = 1 - (\alpha - 1)[(1 - \eta_{м}^{L}) + (1 - \eta_{м}^{\varphi})] \qquad (6.17)$$

Коэффициенты $\eta_{э}^{у}$, $\eta_{э}^{у}$ учитывают фактическое количество хранящейся продукции и рассчитываются включением коэффициента загрузки $a = \dfrac{G_{з}}{G_{р}}$ в (6.14):

$$\eta_{э}^{з} = 1 - 2{,}05N / aG_{р} \qquad (6.18)$$

Расчет времени работы системы вентиляции с применением понятия потенциала влажности приводит к оптимальной производительности системы вентиля-

ции и сокращению времени работы вентиляционных систем.

Экономическая эффективность за счет повышения коэффициента эффективности хранения $\eta_х$ составляет:

$$\Delta Э_х = С_з \Delta\eta_х G_р, \quad (6.19)$$

где $С_з$ – осредненная закупочная цена, $С_з = 8000$ р. (в ценах 2016 г.).

Годовой экономический эффект от повышения сохранности хранящегося картофеля, полученный в результате оптимизации режимов работы СОМ в ООО Агрофирма «Белозерки» и ОАО «Подстепкинское» составил 1 202 000 руб.

Таблица 6.4 – Технико-экономические показатели хранения СРС (в ценах 2016 г.)

Показатели	ООО Агрофирма «Белозерки»		ОАО «Подстепкинское»	
	До оптимизации	После оптимизации	До оптимизации	После оптимизации
Продолжительность работы системы вентиляции τ, ч/год (8 месяцев хранения)	922	864	896	852
Объем хранящейся продукции $G_р$, т	1200		1000	
Повышение коэффициента эффективности хранения $\Delta\eta_х$	–	0,07	–	0,066
Удельный экономический эффект за счет повышения $\Delta\eta_х$ (8 месяцев хранения), $\Delta С_с$, руб/т ·год	–	560	–	530
Экономический эффект за счет повышения $\Delta\eta_х$ (8 месяцев хранения), ΔС, руб/год	–	672000	–	530000

6.3. Оценка экономической эффективности реконструкции теплового контура производственного сельскохозяйственного здания

Проект реконструкции теплового контура был выполнен для типового коровника на z = 200 голов коров с беспривязным содержанием, расположенного в Самарской области. Конструктивные характеристики теплового контура до и после реконструкции представлены в приложении 12.

Результаты теплотехнического и влажностного расчета теплового контура

представлены в таблице 6.5.

Таблица 6.5 – Теплотехнические и влажностные характеристики теплового контура коровника

Показатель	До реконструкции	После реконструкции	
		1 вариант	2 вариант
Требуемое сопротивление теплопередаче $R_0^{тр}$, м^2·°С/Вт	0,8	0,8	0,8
Приведенные сопротивления теплопередаче $R_0^{сущ}$, м^2·°С/Вт наружная стена покрытие	 0,36 0,17	 0,83 0,88	 0,82 0,90
Нормируемое сопротивление влагопередаче $R_\theta^{тр}$, м^2·ч·ºВ/кг	197	88	88
Приведенное сопротивление влагопередаче $R_{\theta,\,0}$, м^2·ч·ºВ/кг наружная стена покрытие	 141343 10600	 142255 11356	 7092 2745

Анализ теплового баланса реконструируемого коровника на 200 голов позволил сделать ряд практических выводов.

1. Коровник следует эксплуатировать при расчетном количестве животных (z = 200 голов). При этом максимальная мощность резервной системы отопления рассчитанная по (1.24), составляет $Q_{наг} = c_в \rho_в L_{н\,min}(t_н^р - t_н) = 0{,}279 \cdot 1{,}247 \cdot 22707 \times$ $\times(-0{,}3-(-30) = 234632$ Вт. При содержании в этом же коровнике 100 голов КРС мощность системы резервного отопления увеличивается и равна $Q_{наг} = 0{,}279 \cdot 1{,}247 \cdot 22707\,(4{,}9-(-30)) = 275712$ Вт, т.е. на 17,5 % больше.

Если допустить подачу минимального удельного расхода наружного воздуха в холодный период года в объеме 2,5 м^3/(ч·ц) [230], то условные температуры наружного воздуха соответственно составят: при 200 головах $t_н^р = -21{,}2$ °С, при 100 головах $t_н^р = -5{,}6$ °С. Максимальные расходы теплоты на нагрев наружного воздуха (мощность систем резервного отопления) равны:

при 200 головах $Q_{наг} = 0{,}279 \cdot 1{,}247 \cdot 2500(-21{,}2-(-30)) = 7654$ Вт;

при 100 головах $Q_{наг} = 0{,}279 \cdot 1{,}247 \cdot 2500(-5{,}6-(-30)) = 2122\,3$ Вт.

2. Необходимо эксплуатировать животноводческие помещения с максимальной расчетной заполняемостью. Этого можно достигнуть или снижением

единичной вместимости помещения (в допустимых или рациональных пределах) или выполнять коровники в секционном исполнении.

3. Продолжительность периода с температурой наружного воздуха ниже условной расчетной температуры $t_{н}^{р}$, когда требуется подогрев приточного воздуха, зависит от климатических характеристик района строительства. В частности в Тольятти для рассматриваемого коровника этот период составляет 137 суток, для такого же коровника, расположенного в г. Краснодаре – 56 суток.

Из сравнения результатов влажностных расчетов наружной стены, выполненной из железобетона и дерева, имеем: величина приведенного сопротивления влагопередаче деревянной конструкции в 20 раз меньше, чем железобетонной ($R_{\theta,0}^{д} = 7092$ м^2·ч·°В/кг; $R_{\theta,0}^{ж/б} = 142255$ м^2·ч·°В/кг).

Исходя из формул (5.30) и (5.33) максимальное количество влаги, удаляемое через наружное ограждение, $G_{вл}^{огр}$, кг/ч, равно: $G_{вл}^{огр} = \dfrac{(\theta_{в} - \theta_{н})F}{R_{\theta,0}}$.

Количество влаги, удаляемое через стену из железобетона:

$$G_{вл}^{ж/б} = \frac{(12{,}3 - 7{,}2)2070}{142255} = 0{,}074 \text{ кг/ч.}$$

Количество влаги, удаляемое через стену из дерева:

$$G_{вл}^{дер} = \frac{(12{,}3 - 7{,}2)2070}{7092} = 1{,}489 \text{ кг/ч.}$$

Из расчета видно, что деревянные конструкции в большей степени обеспечивают удаление избытков влаги в атмосферу, чем железобетонные.

У бесчердачного покрытия, выполненного из дерева, величина $R_{\theta,0}$ в 4 раза меньше, чем у железобетонного ($R_{\theta,0}^{д} = 2745$ м^2·ч·°В/кг, $R_{\theta,0}^{ж/б} = 11356$ м^2·ч·°В/кг), а, значит, удаление влагоизбытков будет происходить интенсивнее.

Таким образом, необходимо предусматривать наружные ограждающие конструкции из строительных материалов, обладающих большим коэффициентом влагопроводности χ, чтобы через них в рассматриваемый период эксплуатации удалялись излишки влаги. В частности, коэффициент влагопроводности дерева в

11 раз больше, чем у железобетона ($\chi_д$ = 32·10^{-6} кг/(м·ч·°В), $\chi_{ж/б}$ = 3·10^{-6} кг/(м·ч·°В)). Следовательно, использование дерева для выполнения наружных ограждений предпочтительней.

Применение влагопроницаемых ограждающих конструкций животноводческих, птицеводческих зданий, хранилищ СРС позволяет использовать их как неотапливаемые даже в холодный период года, когда температура наружного воздуха $t_н$ ниже условной $t_н^р$, за счет практически полного отключения систем вентиляции и удаления избытков влаги через наружные стены и покрытия. Согласно проведенным расчетам наружные ограждения из влагопроницаемых материалов полностью удовлетворяет теплотехническим требованиям.

Экономическая эффективность принятых инженерных решений определяется расходами на энергоноситель для нагрева минимального количества приточного воздуха для ассимиляции избытков влаги в помещениях сельскохозяйственных зданий. Расчетные технико-экономические показатели представлены в таблице 6.6.

Таблица 6.6 – Показатели эффективности реконструкции теплового контура коровника

Показатель	До реконструкции	После реконструкции	
		1 вариант	2 вариант
Условная наружная температура $t_н^р$, °С.	2,3	–0,3	–0,3
Минимальное количество приточного воздуха $L'_{н.min}$, м^3/ч	22692	22692	22421
Затраты теплоты на нагрев наружного воздуха $Q_{наг}$, Вт	255003	234487	231677
Годовые затраты теплоты зданием $Q_{наг}^{год}$, МДж	1,4·10^6	1,2·10^6	1,1·10^6
Количество электроэнергии, необходимое для нагрева приточного воздуха N, кВт·ч/год	388889	333333	305556
Затраты денежных средств на электроэнергию С, тыс. руб/год (в ценах 2016 года)	777,8	666,7	611,1

Предложенные варианты реконструкции теплового контура коровника приняты к внедрению ООО «Васильевское», ООО СХП «ЛИК», ЗАО «Луначарск».

6.4. Выводы по главе 6

1. Применение механической вентиляции в холодный период года обосновано снижением затрат тепловой энергии на нагрев избыточного инфильтрационного воздуха.

Внедрение режимной карты работы комбинированной естественно-механической вентиляции в практику проектирования ООО «Проектпромвентиляция» и ООО «Смарт-Хаус» при разработке проектно-сметной документации по реализации программ капитального ремонта жилого фонда Нижегородской и Самарской областей общим объемом 3040 тыс. м^2 обуславливает расчетный экономический эффект 39,37 млн. руб. в ценах 2016 года.

2. Проведена оценка показателей эффективности систем обеспечения параметров микроклимата при сушке и хранении биологически активного сырья (травы, зерна, хранящегося картофеля и овощей). Показаны количественные значения эффективности сушки и хранения.

Оптимизация режимов работы систем активной вентиляции при заготовке грубых кормов и хранении сельскохозяйственной продукции на предприятиях сельскохозяйственной отрасли Самарской области (ООО Агрофирма «Белозерки», ОАО «Подстепкинское», ООО СХП «Олимп-Агро», ООО Агрофирма «Волжанин») позволила снизить убытки продукции в среднем на 5 %, повысить питательную ценность кормов и обеспечила общий годовой экономический эффект в размере 5,6 млн. руб. в ценах 2016 года.

3. На основе результатов конкретного примера расчетов даны практические рекомендации по реконструкции теплового контура коровника и режимам работы систем обеспечения микроклимата в круглогодичном цикле эксплуатации в сельскохозяйственных предприятиях Самарской области (ООО «Васильевское», ООО СХП «ЛИК», ЗАО «Луначарск»). Экономический эффект заключается в снижении энергоемкости и повышении долговечности зданий и составил 170 000 руб. на одно здание коровника в ценах 2016 года (количество реконструируемых зданий – 4 коровника).

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 натурных условиях определены аэродинамические характеристики подземных пешеходных переходов с целью создания в тоннелях необходимых воздухообменов при использова-

нии 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 ($w_{тр}$ – θ), необходимые для расчета интенсивности влагообмена и режимов работы систем активной вентиляции.

8. Аналитически и экспериментально в натурных 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 ограждений; 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.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

Основные условные обозначения

А – амплитуда колебания температуры, °С;

a – коэффициент температуропроводности, м^2/с; степень загрузки хранилища, доли;

c – удельная теплоемкость, кДж/(кг·°С); Вт·ч/(кг·°С); аэродинамический коэффициент, доли;

D – тепловая инерция ограждающей конструкции; коэффициент диффузии влаги, м/с;

d – влагосодержание воздуха, г/кг сух. в-ха; диаметр, мм;

E – максимальная упругость водяного пара, Па;

e – упругость водяного пара, Па;

F – площадь поверхности, м^2;

G – массовый расход воздуха, г/ч, кг/ч; масса продукции, кг, т; вместимость хранилища, кг, т;

G_p – расчетная вместимость хранилища, т;

H, h – высота, мм , м;

I – энтальпия, кДж/кг;

i – удельный поток влаги, кг/(м^{2}ч); удельная энтальпия воздуха, кДж/кг, Вт·ч/кг;

j – удельные влаговыделения, г/(ч·гол), г/(ч·кг), г/(т·ч); удельная интенсивность влагопотока, кг/(кг·ч); поток влаги, г/(м^2·ч);

k – коэффициент теплопередачи ограждений, Вт/(м^2·°С);

L, L_m – объемный расход воздуха, м^3/ч; удельные расходы воздуха, м^3/(м^2·ч), м^3/(т·ч);

ℓ – длина, м.

m – коэффициент, учитывающий долю теплопотерь через полы, подземные и обвалованные части наружных ограждений; масса, кг;

n – коэффициент, учитывающий зависимость положения наружной поверхности ограждающих конструкций по отношению к наружному воздуху; расчетное количество животных, птиц, шт.; кратность воздухообмена, ч–1;

$P_{огр}$ – удельные потери теплоты через тепловой контур здания, Вт/м^2;

p – масса одной птицы, кг; давление, Па; парциальное давление водяных паров, Па;

Δp_t – естественное гравитационное давление, Па, кг/м^2;

Δp_υ – естественное ветровое давление, Па, кг/м^2;

Δp – аэродинамическое сопротивление, Па/м;

Q – количество теплоты, Вт; кДж/ч; объемный расход воздуха, м^3/ч;

q – удельный тепловой поток, Вт/м^2; удельные тепловыделения, Вт/гол, Вт/кг, Вт/т; интенсивность солнечной радиации, ккал/(м^2·ч); теплота солнечной радиации, МДж/м^2;

q_v – удельные биологические тепловыделения, Вт/кг, Вт/(т·ч);

R – удельные потери давления по длине, Па/м; радиус, м;

$R_0^{тр}$ – требуемое сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции, м^2·°С/Вт;

R_0 – приведенное сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции, м^2·°С/Вт;

R_s – термическое сопротивление однородного слоя ограждающей конструкции, м^2·°С/Вт;

$R_п^{тр}$ – требуемое сопротивление паропроницанию ограждающей конструкции, м^{2}чПа/мг;

$R_п$ – сопротивление паропроницанию ограждающей конструкции, м^2·ч·Па/мг;

$R_Θ^{тр}$ – требуемое сопротивление влагопередаче ограждающей конструкции, м^2·ч·°В/кг;

$R_{Θ,0}$ – приведенное сопротивление влагопередаче ограждающей конструкции, м^2·ч·°В/кг;

r – скрытая теплота парообразования, кДж/кг;

S – площадь поверхности контакта, м^2; площадь поверхности насыпи, м^2/м^3, м^2/т;

s – коэффициент теплоусвоения материала, Вт/(м^2·°С);

T, t – температура, К, °С;

$t_н^р$ – условная температура наружного воздуха, начиная с которой требуется подогрев приточного воздуха, ºС;

t_R – радиационная температура помещения, ºС;

U – влагосодержание продукции, кг/(кг сух. мат);

u – скорость воздуха в насыпи, м/с; влагосодержание, кг/кг сух. в-ва;

V, v – скорость воздуха, м/с; объем помещения, м^3;

w – влажность материала, %, доли;

W – интенсивность влагопотока, кг/ч, г/ч;

Y – показатель теплоусвоения, Вт/(м^2·°С);

z – количество животных, гол.; шт.; время, ч; темп снижения температуры, °С/ч; °С/сут.;

Δz – темп охлаждения, °С/ч;

α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м^2·°С);

α_θ, α_p – коэффициенты влагоотдачи, кг/(кг·ч·°В), кг/(кг·ч·Па);

β^{Θ} – коэффициент влагообмена поверхности ограждающей конструкции с воздухом, кг/(ч·м^2·ºВ);

$\beta_ш$ – коэффициент, учитывающий фактическую шероховатость стенок воздуховода;

δ – толщина слоя, м; относительная ошибка, доли;

ε – тепловлажностная характеристика, кДж/кг;

ζ – коэффициент местного сопротивления;

η – влагоемкость материала, кг/(ºВ·кг сух. в-ва);

θ – потенциал переноса вещества (влаги), ºМ; потенциал влажности, °В;

λ – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·ºС); коэффициент трения, Па/м;

μ – коэффициент паропроницаемости материала, кг/(м·ч·Па); мг/(м·ч·Па);

ξ – удельная пароемкость материала, г/(кг·Па);

ρ – плотность, кг/м^3;

τ – температура поверхности ограждающей конструкции, °С; продолжительность сушки, ч; время, с;

υ – подвижность воздуха в помещении, м/с;

ν – коэффициент кинематической вязкости, м^2/с.

φ – относительная влажность воздуха, %; доли;

γ – удельный вес, кг/м^3;

χ – коэффициент влагопроводности, кг/(м·ч·°В);

$\omega_в$ – массовая влажность материала, %.

η_A, η_E – величины, характеризующие мастерство архитекторов и инженеров, доли;

$\eta_к$, $\eta_ж$, $\eta_{с.т}$ – коэффициенты эффективности хранения, содержания животных, сохранности питательных веществ при сушке травы, доли;

$К_{об}$ – коэффициент обеспеченности, доли;

$К_в$ – коэффициент использования вентиляции, доли;

П – пористость, доли, %;

Надстрочные и подстрочные индексы

ак – аккумулированный; б – биологический, барометрический; БП – бесчердачное покрытие; в – воздух, внутренний; вл – влага; во, вк -начальные и конечные параметры воздуха; вор – ворота; в.п – внутренняя поверхность; вх – вход; вых – выход; г – гигроскопический, грунт, горячий, год; д – действительный; дв – дверь; е – естественная; ж – животное, жидкость; з – замерзание, зерно; и – испарение, инфильтрация; к – каркас, конвективный, кондиционный; ко – начальные пара-

метры продукции; кр – критическая; л – лучистый; м – мерзлый; мт – мокрый термометр; н – насыпь, наружный, нормируемый; НС – наружная стена; наг – нагрев; норм – нормируемый; н.п – наружная поверхность; о – общее, начальный; огр – ограждение; О, ок – окно; об – обеспеченность; опт – оптимальный; п – помещение, покрытие, полный; пов – поверхность; покр – покрытие; пр – приток; пт – птица; пол – пол; р – равновесный, расчетный, рециркуляционный, реверсивный, точка росы; рец – рециркуляция; с – сено, сушка, сухой термометр; св - сухое вещество; ск – скрытый; сн –снег; ср – средний; СРС – сочное растительное сырье; ст – стена; сут – сутки; т – теплопроводность, текущий, тело; тр – трава, требуемый; т.р – точка росы; у - удаляемый; уд – удельный, удаляемый; ут – утеплитель; ф – физическая, фильтрационный; ф.б. – фильтровальная бумага; х – холодный; э – экспериментальный; эф – эффективный; я – явный; R – радиационный; t – температура; θ – потенциал влажности; * – абсолютные температура и давление.

Сокращения в диссертации

ВК – режим вынужденной конвекции;
ЕК – режим естественной конвекции;
КЕ – кормовая единица;
КРС – крупный рогатый скот;
КСОМ – комплексная система обеспечения микроклимата;
ПДК – предельная допустимая концентрация;
РСАВ – реверсивная система активной вентиляции;
САВ – система активной вентиляции;
СВАО – система водоаэрозольного охлаждения;
СОМ – система обеспечения микроклимата;
СРС – сочное растительное сырье.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авгуль, Н. Н. Адсорбция газов и паров на однородных поверхностях / Н. Н. Авгуль. – М. : Химия, 1975. – 384 с.

2. Аликаев, В. А. Зоогигиена / В. А. Аликаев, В. Ф. Костюнина. – М. : Колос, 1983. – 239 с.

3. Альтшуль, А. Д. Гидравлика и аэродинамика / А. Д. Альтшуль, Л. С. Животовский, Л. П. Иванов. – М. : Стройиздат, 1987. – 414 с.

4. Алямовский, И. Г. Зависимость интенсивности дыхания и тепловыделений плодов и овощей от температуры / И. Г. Алямовский // Холодильная техника. – 1967. – № 6. – С. 41-42.

5. Алямовский, И. Г. Тепло- и массообмен при охлаждении и хранении пищевых продуктов : автореф. дис. … доктора техн. наук : 05.18.14 / Алямовский Игорь Григорьевич. – Л., 1974. – 33 с.

6. Ануфриев, Л. Н. Теплофизические расчеты сельскохозяйственных производственных зданий / Л. Н. Ануфриев, И. А. Кожинов, Г. М. Позин. – М. : Стройиздат, 1974. – 216 с.

7. Атаназевич, В. И. Сушка зерна / В. И. Атаназевич. – М. : Агропромиздат, 1989. – 240 с.

8. Ахиазарова, С. Л. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии : учебное пособие для химико-технологических специальностей вузов / С. Л. Ахиазарова, В. В. Кафаров. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1985. – 327 с.

9. Ахмедов, М. Ш. Интенсивные энергосберегающие способы заготовки сена в условиях Северо-Запада Российской Федерации / М. Ш. Ахмедов. – СПб. : СЗНИИ МЭСХ, 2001. – 144 с.

10. Басин, Г. Л. Расчет воздухообменов и температурно-влажностных режимов карто- фелехранилищ / Г. Л. Басин // НИИСантехники. Отопление и вентиляция промышленных и сельскохозяйственных зданий. – 1965. – сб. № 6. – С. 128-147.

11. Батурин, В. В. Вентиляция машиностроительных заводов / В. В. Батурин, В. В. Кучерук. – М. : Машгиз, 1954. – 483 с.

12. Батурин, В. В. Основы промышленной вентиляции / В. В. Батурин. – М. : Профиздат, 1965. – 608 с.

13. Беленчук, В. И. Повышение качества сена / В. И. Беленчук. – М. : ВАСХНИЛ, 1984. – 64 с.

14. Берман, Н. И. Тепломассоперенос в плотном продуваемом слое плодов и овощей / Н. И. Берман, В. А. Календерьян // ИФЖ. – 1986. – № 2. – С. 266-272.

15. Беспалов, Д. П. Психрометрические таблицы /Д. П. Беспалов, Л. Т. Матвеев, В. Н. Козлов, Л.И. Наумова. – Л.: Гидрометеоиздат, 1981. – 270 с.

16. Благовещенский, Г. В. Сено, сенаж и травяная резка / Г. В. Благовещенский. – М. : Моск. рабочий, 1980. – 157 с.

17. Бланке, В. Микроклимат помещений и его влияние на животных / В. Бланке // Сельское хозяйство за рубежом. – 1974. – № 7. – С. 17-18.

18. Бобровицкий, И. И. Гибридная вентиляция в многоэтажных жилых зданиях / И. И. Бобровицкий, Н. В. Шилкин // АВОК. – 2010. – № 3. – С. 16-23.

19. Богословский, В. Н. К определению потенциала влажности наружного климата / В. Н. Богословский, Б. В. Абрамов // Оптимизация систем отопления, вентиляции, кондиционирования воздуха и теплогазоснабжения : сб. науч. тр. МИСИ. – 1980. – № 176. – С. 33–41.

20. Богословский, В. Н. О потенциале влажности / В. Н. Богословский // Инж.-физ. журнал. – 1965. – т. 8. – № 2. – С. 216-222.

21. Богословский, В. Н. Основы теории потенциала влажности материала применительно к наружным ограждениям оболочки здания / В. Н. Богословский. – М. : изд-во МГСУ, 2013. – 112 с.

22. Богословский, В.Н. Отопление и вентиляция: Учебник для вузов: в 2 ч. Ч.2. Вентиляция / В.Н. Богословский, В.И. Новожилов, Б.Д. Симаков, В.П. Титов; Под ред. В.Н. Богословского. – М., Стройиздат, 1976. – 439 с.

23. Богословский, В. Н. Потенциал влажности. Теоретические основы / В. Н. Богословский, В. Г. Гагарин // Российская академия архитектуры и строительства. Вестник отделения строительных наук. – 1996. – № 1. – С. 12-14.

24. Богословский, В. Н. Применение потенциала влажности к расчету тепловлагообмена между воздухом и жидкостью / В. Н. Богословский, А. Н. Гвоздков // Водоснабжение и санитарная техника. – 1985. – № 10. – С. 8-9.

25. Богословский, В. Н. Расчет влагопередачи ограждений на основе потенциала влажности с использованием влажностных характеристик, полученных способом разрезной неизотермической колонки / В. Н. Богословский, А. М. Микшер // Теплогазоснабжение и вентиляция : сб. науч. тр. МИСИ. – 1977. – № 144. – С. 79-85.

26. Богословский, В. Н. Расчет тепловлагообмена между воздухом и жидкостью с позиции теории потенциала влажности / В. Н. Богословский, А. Н. Гвоздков // Вентиляция и кондиционирование воздуха промышленных и сельскохозяйственных зданий : сб. науч. тр. – Рига : Риж. политехн. ин-т, 1986. – С. 25-37.

27. Богословский, В. Н. Строительная теплофизика (Теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха) : учебник для вузов. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Высш. школа, 1982. – 415 с.

28. Богословский, В. Н. Теплофизика аппаратов утилизации тепла систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха / В. Н. Богословский, М. Я. Поз. – М. : Стройиздат, 1983. – 320 с.

29. Богуславский, Л. Д. Экономическая эффективность оптимизации уровня теплозащиты зданий / Л. Д. Богуславский. – М. : Стройиздат, 1981. – 102 с.

30. Богуславский, Л. Д. Экономия теплоты в жилых зданиях / Л. Д. Богуславский. – М. : Стройиздат, 1990. – 119 с.

31. Бодров, В. И. Заготовка и хранение сена / В. И. Бодров, И. А. Фетисов. – Горький : Волго-Вятское кн. изд-во, 1988. – 96 с.

32. Бодров, В. И. 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.

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

34. Бодров, В. И. Микроклимат зданий и сооружений / В. И. Бодров, М. В. Бодров, Н. А. Трифонов, Т. Н. Чурмеева. – Н. Новгород : Арабеск, 2002. – 394 с.

35. Бодров, В. И. 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.

36. Бодров, В. И. 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.

37. Бодров, В. И. Обеспечение и оптимизация микроклимата хранения сочного растительного сырья и сушки травы : дис. ... доктора технических наук : 05.23.03 / Бодров Валерий Иосифович. – Горький, 1987. – 496 с.

38. Бодров, В. И. 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.

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

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

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

42. Бодров, В. И. Хранение картофеля и овощей : инженерные методы создания и поддержания технологического микроклимата / В. И. Бодров. – Горький, Волго-Вятское книжное изд-во, 1985. – 220 с.

43. Бодров, М. В. 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.

44. Бодров, М. В. Отопление и вентиляция животноводческих и птицеводческих зданий / М. В. Бодров. – Н. Новгород : Изд-во ННГАСУ, 2012. – 145 с.

45. Бондарев, В. А. Как повысить качество сена / В. А. Бондарев, В. М. Соколов, В. Н. Неретин // Кормопроизводство. – 1999. – № 5. – С. 8-10.

46. Борисенко, Е. Ф. Заготовка сена по прогрессивным технологиям / Е. Ф. Борисенко, Л. А. Денисевич. – Минск : Ураджай, 1991. – 64 с.

47. Брилинг, Р. Е. Миграция влаги в строительных ограждениях / Р. Е. Брилинг // Исследования по строительной физике : сб. науч. трудов. - М. : ЦНИИПС, 1949. – № 3. – С. 85-120.

48. Бромлей, М. Ф. Проектирование отопления и вентиляции производственных зданий : учебное пособие для вузов / М. Ф. Бромлей, В. П. Щеглов. – М. : Стройиздат, 1965. – 260 с.

49. Бурцев, С. И. Влажный воздух : состав и свойства : учебное пособие / С. И. Бурцев, Ю. Н. Цветков . – СПб. : СПбГАХПТ, 1998. – 146 с.

50. Валов, В. М. Животноводческие здания с воздухопроницаемыми ограждающими конструкциями : учебное пособие / В. М. Валов. – Омск : ОмПИ, 1986. – 92 с.

51. Валов, В. М. Энергосберегающие животноводческие здания (физико-технические основы проектирования) / В. М. Валов. – М. : Изд-во АСВ, 1997. – 310 с.

52. Валушис, В. Ю. Основы высокотемпературной сушки кормов / В. Ю. Валушис. – М. : Колос, 1977. – 304 с.

53. Варгафтик, Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н. Б. Варгафтик. – М. : Наука, 1972. – 720 с.

54. Васильев, Б. Ф. Натурные исследования температурно-влажностного режима жилых зданий / Б. Ф. Васильев. – М. : Гос. изд-во лит. по стр-ву и архитектуре, 1957. - 210 с.

55. Васильев, Г. П. Экологические аспекты внедрения нетрадиционных возобновляемых источников энергии в энергетический баланс Москвы / Г. П. Васильев // Энергосбережение. – 2004. – № 1. – С. 34-38.

56. Везиришвили, О. Ш. Экономия энергии в системах кондиционирования воздуха / О. Ш. Везиришвили // Водоснабжение и санитарная техника. – 1986. – № 11. – С. 10-11.

57. Вентиляция и отопление цехов машиностроительных заводов / М. И. Гримитлин [и др.]. – М. : Машиностроение, 1993. – 288 с.

58. Вентиляция, кондиционирование и очистка воздуха на предприятиях пищевой промышленности : учебное пособие для вузов / Е. А. Штокман [и др.] ; под ред. Е. А. Штокмана. – М. : АСВ, 2001. – 688 с.

59. Власов, О. Е. Долговечность ограждающих и строительных конструкций / О. Е. Власов. – М. : НИИСФ, 1963. – 116 с.

60. Власов, О. Е. Основы строительной теплотехники / О. Е. Власов. – М. : ВИА РККА, 1938. – 93 с.

61. Внутренние санитарно-технические устройства. В 3 ч. Ч. 3. Вентиляция и кондиционирование воздуха / В. Н. Богословский [и др.] ; под ред. Н. Н. Павлова, Ю. И. Шиллера. - 4-е изд., перераб. и доп. - Москва : Стройиздат, 1992. - 319 с.

62. Волкинд, И. Л. О теории тепловлажностных процессов в камерах хранения холодильников / И. Л. Волкинд // Холодильная техника. – 1980. – № 11. – С. 41-42.

63. Волкинд, И. Л. Применение активной вентиляции при хранении картофеля и овощей / И. Л. Волкинд, А. С. Лобанова. – М. : [б.и.], 1971. – 56 с.

64. Волков, М. А. Тепло- массообменные процессы при хранении пищевых продуктов / М. А. Волков. – М. : Лег. и пищ. пром-сть, 1982. – 272 с.

65. Волосов, Ю. В. Удельный расход воздуха и потери веса картофеля при хранении в условиях активного вентилирования / Ю. В. Волосов // Хранение, переработка и торговля картофеля, овощей и плодов. – Киев, 1969. – С. 28–33.

66. Вытесняющая вентиляция в непроизводственных зданиях : справочное руководство REHVA / [пер. с англ.] ; под ред. Хакон Скистад. – М. : АВОК-ПРЕСС, 2003. – 99 с.

67. Гагарин, В. Г. Исследование потенциальности векторного поля потока влаги в капиллярно-пористом материале методами векторного анализа / В. Г. Гагарин // Academia. Архитектура и строительство. – 2008. – № 3. – С. 70-73.

68. Гагарин, В. Г. Математическая модель и инженерный метод расчета влажностного состояния ограждающих конструкций / В. Г. Гагарин, В. В. Козлов // Academia. Архитектура и строительство. – 2006. – № 2. – С. 60-63.

69. Гауптман, Я. Этология сельскохозяйственных животных / Я. Гауптман, Б. Чумливски, Я. Душек [и др.]. – М.: Колос, 1977. – 304 с.

70. Гвоздков, А. Н. Особенности протекания процессов тепло- и влагообмена в контактных аппаратах с позиции теории потенциала влажности / А. Н. Гвоздков // Качество внутреннего воздуха и окружающей среды : мат-лы Междун. науч. конф-ции / ВолгГАСА. – Волгоград, 2002. – С. 101-105.

71. Гвоздков, А. Н. Тепло- и влагообмен в системе «воздух-вода» с позиции теории потенциала влажности / А. Н. Гвоздков // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2015. – № 11-12. – С. 31-40.

72. Гибшман, Е.Е. Мосты и сооружения на дорогах: учебник. Ч.2 / Е.Е. Гибшман, В.С. Киримов, Л.В. Маковский [и др.]. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Транспорт, 1972. – 404 с.

73. Гинзбург, А. С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов / А. С. Гинзбург. – М. : Пищ. пром-сть, 1973. – 528 с.

74. Гинзбург, А. С. Современные способы расчета и проектирования процесса сушки зерна / А. С. Гинзбург, В. Д. Скверчак. – М. : Элеваторная пром-сть, 1980. – 74 с.

75. Гинзбург, А. С. Теплофизические характеристики пищевых продуктов и материалов / А. С. Гинзбург, М. А. Громов, Г. И. Красовская. – М. : Пищ. пром-сть, 1980. – 288 с.

76. Гирнык, Н. Л. Математическое описание тепло- и влагообменных процессов в овощехранилищах / Н. Л. Гирнык // Механизац. и электриф. соц. сельского хоз-ва. – 1974. – № 5. – С. 42-44.

77. Гмурман, В. Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике : учеб. пособие / В. Е. Гмурман. – 4-е изд., стер. – М. : Высш. шк., 1997. – 400 с.

78. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В. Е. Гмурман. – 11-е изд., стер. – М. : Высш. шк., 2005. – 279 с.

79. Гоголин, А. А. О применении уравнения Льюиса при расчете поверхностных воздухоохладителей / А. А. Гоголин // Холодильная техника. – 1976. – № 2. – С. 12-14.

80. ГОСТ 24451-80. Тоннели автодорожные. Габариты приближения строений и оборудования. – Введ. с 01.01.1982. – М. : Изд-во стандартов, 1982. – 4 с.

81. ГОСТ 8.524-85. Таблицы психрометрические. Построение, содержание, расчетные соотношения – М. : Изд-во стандартов, 1986. – 34 с.

82. Грег, С. Адсорбция, удельная поверхность, пористость / С. Грег, К. Синг. – М. : Мир, 1970. – 407 с.

83. Грек, Ф. З. Гидравлические и тепловые основы расчета сушки сена : учебное пособие / Ф. З. Грек. – Л. : [б.и.], 1990. – 31 с.

84. Гримитлин, А. М. Воздухообмен в цехах судостроительных заводов / А. М. Гримитлин, Г. М. Позин // Сантехника, отопление, кондиционирование. – 2014. – № 1 (145). – С. 106-108.

85. Гримитлин, М.И. Вентиляция и отопление цехов судостроительных заводов / М. И. Гримитлин [и др.]. – Л.: 1981. – 105 с.

86. Гримитлин, М.И. Вентиляция и отопление цехов переработки пластмасс / М. И. Гримитлин [и др.]. – Л. : Химия, 1983. – 134 с

87. Гримитлин, М. И. Распределение воздуха в помещениях / М. И. Гримитлин. – СПб. : Изд-во НПП «Экоюрус-Венто», 1994. – 316 с.

88. Грудзинский, М. М. Основные принципы расчета и конструирования «теплых» чердаков / М. М. Грудзинский, М. Я. Поз, И. И. Староверова // Научно-техн. реф. сб. - Сер. 21. - Вып. 1 (151). – М. : ЦИНИС Госстроя СССР, 1980. – С. 3 – 12.

89. Грудзинский, М. М. Отопительно-вентиляционные системы зданий повышенной этажности / М. М. Грудзинский, В. И. Ливчак, М. Я. Поз. – М. : Стройиздат, 1982. – 256 с.

90. Гусев, В. С. Методы теплотехнических расчетов по обеспечению микроклимата в сооружениях гражданской обороны / В. С. Гусев. – М. : Стройиздат, 1975. – 160 с.

91. Джоунс, М. Биохимическая термодинамика / М. Джоунс. – М. : Мир, 1982. – 440 с.

92. Дионов, С. Н. Механическая вентиляция – путь к комфорту и энергосбережению // С. Н. Дионов, Е. Г. Малявина, Ю. А. Табунщиков // Энергосбережение. – 2000. – № 3. – С. 5-9.

93. Дравининкас, А. М. Механизация заготовки кормов : Опыт хозяйств литовской ССР / А. М. Дравининкас. – М. : Колос, 1983. – 192 с.

94. Дубровин, Е. Н. Пересечения в разных уровнях на городских магистралях : учебное пособие для вузов / Е. Н. Дубровин, Ю. С. Ланцберг. – М. : Высш. шк., 1977. – 429 с.

95. Дьяконов, В. П. Вейвлеты : от теории к практике / В. П. Дьяконов. – М. : СОЛОН-Р, 2002. – 448 с.

96. Дячек, П. И. Исследование и разработка принципов вентиляции картофелехранилищ : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.03 / Дячек Петр Иванович. - Минск, 1979. - 21 с.

97. Егиазаров, А. Г. Отопление и вентиляция сельскохозяйственных зданий / А. Г. Егиазаров, О. Я. Кокорин, Ю. М. Прыгунов. – Киев : Будівельник, 1976. – 223 с.

98. Егиазаров, А. Г. Отопление и вентиляция зданий и сооружений сельскохозяйственных комплексов / А. Г. Егиазаров. – М. : Стройиздат, 1981. – 239 с.

99. Егоров, Г. А. Технологические свойства зерна / Г. А. Егоров. – М. : Агропромиздат, 1985. – 334 с.

100. Елинский, И. И. Вентиляция и отопление гальванических цехов машиностроительных предприятий / И. И. Елинский. – М. : Машиностроение, 1989. – 149 с.

101. Жадан, В. З. Влагообмен в плодоовощехранилищах / В. З. Жадан. – М. : Агропромиздат, 1985. – 197 с.

102. Жадан, В. З. Критерии климатического районирования страны в целях использования естественного холода в картофеле- и овощехранилищах / В.З. Жадан, Н.Н. Рослов, Л.В. Мартынова, С.И. Кулаков // Холодильная техника. – 1986. – № 6. – С. 10-13.

103. Жадан, В. З. Теоретические основы кондиционирования воздуха при хранении сочного растительного сырья / В. З. Жадан. – М. : Пищевая промышленность, 1972. – 238 с.

104. Жадан, В. З. Теплофизические основы хранения сочного растительного сырья на пищевых предприятиях / В. З. Жадан. – М. : Пищевая промышленность, 1976. – 238 с.

105. Журавлев, А. П. Технология и техника сушки зерна / А. П. Журавлев. – Самара : [б.и.], 2000. – 200 с.

106. Заготовка прессованного в короткомерные тюки сена с досушиванием принудительным вентилированием : рекомендации / НИПТИМЭСХ НЗ РФ. – Л. : Пушкин, 1982. – 35 с.

107. Зафрен, С. Я. Технология приготовления кормов / С. Я. Зафрен. – М. : Колос, 1977. – 239 с.

108. Ивянский, А. З. Улучшение воздушно-теплового режима жилых зданий / А. З. Ивянский, И. Б. Павлинова // Жилищное строительство. – 1982. - № 4. – С. 32-34.

109. Идельчик, И. Е. Гидравлическое сопротивление / И. Е. Идельчик. – М. : Госэнергоиздат, 1954. – 316 с.

110. Идельчик, И. Е. Механическая очистка промышленных газов / И. Е. Идельчик, Я. Л. Гинзбург ; НИИОГАЗ. – М. : Машиностроение, 1971. – 339 с.

111. Идельчик, И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И. Е. Идельчик. – М. : Машиностроение, 1975. – 559 с.

112. Ильинский, В. М. Коэффициент переноса водяного пара для расчета влажностного состояния ограждающих конструкций / В. М. Ильинский // Инж.-физ. журнал. – 1965. – т. 8. – № 2. – С. 223-228.

113. Ильинский, В. М. Строительная теплофизика / В. М. Ильинский. – М. : Высш. шк., 1974. – 320 с.

114. Интенсивные технологии производства кормов : справочник / Д. А. Алтунин [и др.]. – М. : Росагропромиздат, 1991. – 352 с.

115. Исследование теплопередачи в ограждающих конструкциях теплого чердака и разработка предложений по их оптимизации : научно-технический отчет / ГлавАПУ. – М. : МНИИТЭП, 1977. – 149 с.

116. Исследования эксплуатационного состояния крыши с теплым чердаком и керамзитобетонной панелью покрытия на жилых домах серии Ш-121 в г. Рязани : научно-технический отчет / ЦНИИЭП жилища. – М. : [б.и.], 1979. – 54 с.

117. Казаков, Е. Д. Биохимия зерна и продуктов его переработки / Е. Д. Казаков, В. П. Кретович. – М. : Колос, 1980. – 319 с.

118. Казимиров, А. Н. Определение динамической размерности сушки зерна / А. Н. Казимиров // Техника в сельском хозяйстве. – 2002. – № 4. – С. 38-39.

119. Какалашвили, А. Н. О термодинамической теории тепловлажностных процессов в камерах холодильников / А. Н. Какалашвили, И. Ш. Почхидзе // Холодильная техника. – 1980. – № 12.– С. 44-46.

120. Калашников, М. П. Выделение тепла и влаги в период основного хранения плодоовощной продукции / М. П. Калашников, А. В. Ванчиков // Вестник ВСГУТУ. – 2011. – № 4 (35). – С. 31.

121. Калашников, М. П. Обеспечение параметров микроклимата для хранения картофеля и овощей в условиях резкоконтинентального климата / М. П. Калашников. – Улан-Удэ : ВСГТУ, 1999. – 235 с.

122. Калашников, М. П. Основы тепло- и массопереноса в штабеле плодоовощной продукции при хранении / М. П. Калашников // Вестник ВСГУТУ. – 2010. – № 4 (31). – С. 43-46.

123. Калашников, М. П. Результаты аналитического исследования температурно-влажностных параметров в картофелехранилище при контейнерном способе хранения / М. П. Калашников, А. В. Ванчиков // Вестник ВСГУТУ. – 2014. – № 5 (50). – С. 39-43.

124. Калиничев, В. П. Метрополитены / В. П. Калиничев. – М. : Транспорт, 1988. – 277 с.

125. Калугина, Ю. П. Исследование динамики тепловлажностных процессов и автоматическое регулирование микроклимата картофелехранилищ : автореф. дис. … канд. техн. наук. – М., 1967. – 21 с.

126. Каменев, П. Н. Вентиляция : учебное пособие / П. Н. Каменев, Е. И. Тертичник. – М. : Изд-во АСВ, 2011. – 632 с.

127. Каменев, П. Н. Гидроэлеваторы в строительстве / П. Н. Каменев. – М. : Стройиздат, 1964. – 404 с.

128. Каменев, П. Н. Гидроэлеваторы и другие струйные аппараты / П. Н. Каменев. – М. : Машстройиздат, 1950. – 317 с.

129. Каменев, П. Н. Отопление и вентиляция : учебник для вузов : в 2 ч. Ч. 1. Отопление / П. Н.Каменев, А. Н.Сканави, В. Н.Богословский ; под. ред. В. Н.Богословского. – М. : Стройиздат, 1976. – 483 с.

130. Каменев, П. Н. Отопление и вентиляция : учебник для вузов : в 2 ч. Ч. 2. Вентиляция / П. Н. Каменев. – М. : Стройиздат, 1966. – 480 с.

131. Каменев, П. Н. Расчет воздуховодов и водоструйных аппаратов (элеваторов) по методу перемещения единицы объема / П. Н. Каменев ; Ин-т норм и стандартов строит. пром-сти. – М. ; Л. : Гос. изд-во стандартизации и рационализации, 1934. – 403 с.

132. Каменев, П. Н. Смешивание потоков / П. Н. Каменев. – М. : ГОНТИ, 1936. – 440 с.

133. Карпис, Е. Е. Изменение отношения Льюиса для политропических процессов в форсуночных кондиционерах / Е. Е. Карпис // НИИсантехники. – 1963. – Сб. 15. – С. 68-81.

134. Карпис, Е. Е. Энергосбережение в системах кондиционирования воздуха / Е. Е. Карпис. – М. : Стройиздат, 1986. – 258 с.

135. Киселев, Ю. А. Исследования по теплоустойчивости домашних животных / Ю. А. Киселев // Тепло- и холодоустойчивость домашних животных. – Новосибирск : Наука. – 1976. – С. 10-31.

136. Китайцева Е. Х. Естественная вентиляция жилых зданий / Е. Х. Китайцева, Е. Г. Малявина // АВОК. – 1999. – № 3. – С. 35-40.

137. Ковальчук, М. Адаптация и стресс при содержании и разведении сельскохозяйственных животных / М. Ковальчук, К. Ковальчук. – М. : Колос, 1978. – 272 с.

138. Козлов, В. В. Метод инженерной оценки влажностного состояния современных ограждающих конструкций с повышенным уровнем теплозащиты при учете паропроницаемости, влагопроводности и фильтрации воздуха : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01, 05.23.03 / Козлов Владимир Владимирович. – М., 2004. - 24 с.

139. Козлов, Е. С. Разработка и обоснование рациональных способов сушки травы системами активной вентиляции : дис. ... канд. тех. наук : 05.23.03 / Козлов Евгений Сергеевич. – Н. Новгород, 1996. - 186 с.

140. Кокорин, О. Я. Отечественное оборудование для создания систем отопления и кондиционирования воздуха / О. Я. Кокорин. – М. : [б.и.], 2002. – 96 с.

141. Кокорин, О. Я. Установки кондиционирования воздуха. Основы расчета и проектирования / О. Я. Кокорин. – М. : Машиностроение, 1978. – 264 с.

142. Константинова, В. Е. Исследование систем естественной вытяжной вентиляции в многоэтажных зданиях / В. Е. Константинова, К. С. Светлов // Водоснабжение и санитарная техника. – 1965. – № 6. – С. 10-13.

143. Константинова, В. Е. Расчет воздухообмена в жилых и общественных зданиях / В. Е. Константинова. – М. : Стройиздат, 1964. – 156 с.

144. Константинова, В. Е. Расчет воздухообмена в зданиях методом гидравлической аналогии / В. Е. Константинова // Водоснабжение и санитарная техника. – 1961. - № 11. – С. 18-20.

145. Корма : справочная книга / под ред. М. А. Смурыгина. – М. : Колос, 1977. – 367 с.

146. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука, 1984. – 831 с.

147. Корниенко, С. В. Новая шкала потенциала влажности для прогноза влажностного режима ограждающих конструкций зданий / С. В. Корниенко, А. Г. Перехоженцев // Известия вузов. Строительство. – 2002. – № 3. – С. 4-8.

148. Корниенко, С. В. Потенциал влажности / С. В. Корниенко // Жилищное строительство. – 2005. – № 7. – С. 16-18.

149. Корниенко, С. В. Потенциал влажности для определения влажностного состояния материалов наружных ограждений в неизотермических условиях / С. В. Корниенко // Строительные материалы. – 2006. – № 4. – С. 88-89.

150. Корниенко, С. В. Потенциал влажности. Сравнительный анализ / С. В. Корниенко // Труды международного форума по проблемам науки, техники и образования. – М. : Академия наук о Земле, 2003. – т. 1. – С. 88-90.

151. Короткевич, А. В. Технологии и машины для заготовки кормов из трав и силосных культур / А. В. Короткевич. – Минск : Ураджай, 1991. – 156 с.

152. Корягин, В. А. Выбор режимов сушки активным вентилированием / В. А. Корягин, Л. Б. Печерская // С.-х. теплоэнергетика. – М. : [б.и.], 1992. – С. 26.

153. Креслинь, А. Я. Автоматическое регулирование систем кондиционирования воздуха / А. Я. Креслинь. – М. : Стройиздат, 1972. – 98 с.

154. Креслинь, А. Я. Оптимизация энергопотребления системами кондиционирования воздуха / А. Я. Креслинь. – Рига : РПИ, 1982. – 154 с.

155. Кришер, О. Научные основы техники сушки / О. Кришер. – М. : Изд-во иностран. литры, 1961. – 539 с.

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

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

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

159. 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.

160. 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 (43) . – С. 81-85.

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

162. 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.

163. 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.

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

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

166. Латышенков, М. А. Разработка методов расчета и исследования воздушного режима жилых и общественных зданий повышенной этажности : дис. … канд. техн. наук. – М., 1970. – 187 с.

167. Лесницкий, В. Р. Консервирование трав методом сушки / В. Р. Лесницкий // Корма. - 1972. – № 3. – С. 18-19.

168. Либер, И. С. Проектирование отопления и вентиляции жилых домов на Крайнем Севере / И. С. Либер. – Л. : Стройиздат, 1980. – 192 с.

169. Либер, И. С. Санитарно-технические устройства в крупнопанельном домостроении : пособие для проектировщиков / И. С. Либер. – Л. : Стройиздат, 1970. – 112 с.

170. Ливчак, В. И. Решения по вентиляции многоэтажных жилых зданий / В. И. Ливчак // АВОК. – 1999. – № 6. – С. 24-32.

171. Ливчак, И. Ф. Новое направление в развитии приточной вентиляции высотных зданий / И. Ф. Ливчак // Жилищное строительство. – 2005. - № 4. – С. 5-7.

172. Ливчак, И. Ф. Вентиляция многоэтажных жилых домов / И. Ф. Ливчак. - М. : Гос. изд-во лит. по стр-ву и архитектуре, 1951. – 169 с.

173. Ливчак, И. Ф. Вентиляция многоэтажных жилых зданий / И. Ф. Ливчак, А. Л. Наумов. – М. : АВОК-ПРЕСС, 2005. – 136 с.

174. Ливчак, И. Ф. О совершенствовании развития техники климатизации, вентиляции и теплоснабжения в современных экономических условиях России / И. Ф. Ливчак // Монтажные и специальные работы в строительстве. – 1998. - № 5. – С. 10-13.

175. Ливчак, И. Ф. Особенности вентиляции высотных жилых домов / И. Ф. Ливчак, Т. А. Мелик-Аракелян // АВОК. – 2003. – № 8. – С. 12-19.

176. Ливчак, И. Ф. Регулируемая вентиляция жилых многоэтажных зданий / И. Ф. Ливчак, А. Л. Наумов // АВОК. – 2004. - № 5. – С. 8-12.

177. Литвинова, Т. А. Адсорбция паров воды капиллярно-пористыми телами / Т. А. Литвинова // Тр. НИИ по инженер. изысканиям в стр-ве. – М., 1974. – 144 с.

178. Личко, Н. М. Активное вентилирование зерна / Н. М. Личко, И. П. Лаврик, Н. А. Попов, А.Г.Мякиньков // Защита растений. – 1995. – №10. – С.15-16.

179. Лыков, А. В. Теоретические основы строительной теплофизики / А. В. Лыков. – Минск : Изд-во АН БССР, 1961. – 520 с.

180. Лыков, А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. – М. : Энергия, 1968. – 472 с.

181. Лыков, А. В. Теория тепло- и массопереноса / А. В. Лыков, Ю. А. Михайлов . – М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1963. – 535 с.

182. Лыков, А. В. Явления переноса в капиллярно-пористых телах / А. В. Лыков. – М. : Гостехиздат, 1954. – 296 с.

183. Маковский, Л. В. Проектирование автодорожных и городских тоннелей : учеб. для вузов / Л. В. Маковский. – М. : Транспорт, 1993. – 352 с.

184. Малахов, М. А. Вентиляция помещений многоэтажных жилых зданий / М. А. Малахов // АВОК. – 2000. – № 5. – С. 54-58.

185. Малахов, М. А. Проект естественно-механической вентиляции жилого дома в Москве / М. А. Малахов // АВОК. – 2003. – № 3. – С. 28-35.

186. Малахов, М. А. Системы естественно-механической вентиляции в жилых зданиях с теплым чердаком / М. А. Малахов // АВОК. – 2006. – № 7. – С. 8-20.

187. Малахов, М. А. Усовершенствование вентиляции жилых зданий / М. А. Малахов, А. Е. Савенков // АВОК. – 2009. – № 4. – С. 16-20.

188. Мальтри, В. Сушильные установки сельскохозяйственного назначения / В. Мальтри, Э. Петке, В. Шнайдер. – М. : Машиностроение, 1979. – 526 с.

189. Малявина, Е. Г. Воздушный режим высотного жилого здания в течение года. Ч. 1. Воздушный режим при естественной вытяжной вентиляции / Е. Г. Малявина, С. В. Бирюков, С. Н. Дианов // АВОК. – 2004. – № 8. – С. 6-13.

190. Малявина, Е. Г. Воздушный режим высотного жилого здания в течение года. Ч. 2. Воздушный режим при механической вытяжной вентиляции / Е. Г. Малявина, С. В. Бирюков, С. Н. Дианов // АВОК. – 2005. – № 1. – С. 26-33.

191. Малявина, Е. Г. Учет влияния воздушного режима на работу системы вентиляции жилых зданий / Е. Г. Малявина, С. В. Бирюков, С. Н. Дианов // АВОК. – 2003. – № 6. – С. 14-26.

192. Манюк, В.И. Наладка и эксплуатация водяных тепловых сетей: Справочник / В.И. Манюк и [др]. – М.: Стройиздат, 1988. – 432 с.

193. Маркин, Н. С. Основы теории обработки результатов измерений / Н. С. Маркин. – М. : Изд-во стандартов, 1991. – 176 с.

194. Мачинский, В. Д. О конденсации паров воздуха в строительных ограждениях / В. Д. Мачинский // Строительная промышленность. – 1927. – № 1. – С. 60-62.

195. Мачинский, В. Д. Теплотехнические основы строительства / В. Д. Мачинский. – М. : Стройиздат, 1949. – 327 с.

196. Мельник, Б. Е. Активное вентилирование зерна : справочник / Б. Е. Мельник. – М. : Агропромиздат, 1986. – 159 с.

197. Методические указания по проведению НИР по хранению овощей / Всесоюзная академия сельскохозяйственных наук имени В. И. Ленина. – М. : ВАСХНИЛ, 1982. – 34 с.

198. Мостепанов, Ю. Б. Вентиляция при строительстве подземных сооружений / Ю. Б. Мостепанов, А. Н. Веденин. – Л. : Стройиздат, 1988. – 135 с.

199. Нестеренко, А. В. Основы термодинамических расчетов вентиляции и кондиционирования воздуха : учеб. пособие / А. В. Нестеренко. – М. : Высш. шк., 1971. – 460 с.

200. Нефелов, С. В. Техника автоматического регулирования в системах вентиляции и кондиционирования воздуха / С. В. Нефелов, В. С. Давыдов. – М. : Стройиздат, 1984. – 328 с.

201. НТП-АПК 1.10.01.001-00. Нормы технологического проектирования ферм крупного рогатого скота крестьянских хозяйств [Электронный ресурс] : утверждены Минсельхозом России от 27 июля 2000 г. / НИПИагропром [и др.]. – М. : ГУ ЦНТИ Мелиоводинформ, 2000. – Режим доступа : https://ohranatruda.ru/ot_biblio/norma/244420/. – Заглавие с экрана.

202. НТП-АПК 1.10.02.001-00. Нормы технологического проектирования ферм свиноводческих ферм крестьянских хозяйств [Электронный ресурс] : утверждены Минсельхозом России от 15 сентября 2000 г. / НИПИагропром [и др.]. – М. : Ротапринт Нипиагропрома, 2000. – Режим доступа: https://ohranatruda.ru/ot_biblio/norma/244421/. – Заглавие с экрана.

203. НТП-АПК 1.10.03.001-00. Нормы технологического проектирования овцеводческих предприятий [Электронный ресурс] : утверждены Минсельхозом России от 15 сентября 2000 г. / НИПИагропром [и др.]. – М. : Ротапринт Нипиагропрома, 2000. – Режим доступа: https://ohranatruda.ru/ot_biblio/norma/244422/. - Заглавие с экрана.

204. НТП-АПК 1.10.04.001-00. Нормы технологического проектирования коневодческих предприятий [Электронный ресурс] : утверждены Минсельхозом России от 15 сентября 2000 г. / НИПИагропром [и др.]. – М. : Ротапринт Нипиагропрома, 2000. – Режим доступа: https://ohranatruda.ru/ot_biblio/norma/244424/. - Заглавие с экрана.

205. НТП-АПК 1.10.05.001-01. Нормы технологического проектирования птицеводческих предприятий [Электронный ресурс] : утверждены Минсельхозом России от 28 августа 2001 г. / НИПИагропром [и др.]. – М. : Ротапринт Нипиагропрома, 2001. – Режим доступа: https://ohranatruda.ru/ot_biblio/norma/244427/. – Заглавие с экрана.

206. НТП-АПК 1.10.06.001-00. Нормы технологического проектирования звероводческих и кролиководческих ферм [Электронный ресурс]. : утверждены Минсельхозом России от 27 декабря 2000 г. / НИПИагропром [и др.]. – М. : ГУ ЦНТИ Мелиоводинформ, 2000. - Режим доступа: https://ohranatruda.ru/ot_biblio/norma/244428/. – Заглавие с экрана.

207. НТП-АПК 1.10.06.002-00. Нормы технологического проектирования предприятий малой мощности звероводческих и кролиководческих ферм [Электронный ресурс] : утверждены Минсельхозом России от 27 декабря 2000 г. / НИПИагропром [и др.]. – М. : Ротапринт Нипиагропрома, 2001. – Режим доступа: https://ohranatruda.ru/ot_biblio/norma/403584/. – Заглавие с экрана.

208. НТП-АПК 1.10.12.001-02. Нормы технологического проектирования предприятий по хранению и обработке картофеля и плодоовощной продукции [Электронный ресурс] : утверждены Минсельхозом России от 30 апреля 2002 г. / НИПИагропром [и др.]. – М. : ФГУП Гипронисельпром, 2002. – Режим доступа: https://ohranatruda.ru/ot_biblio/norma/244438/. –Заглавие с экрана.

209. Нэш, М. Дж. Консервирование и хранение сельскохозяйственных продуктов / М. Дж. Нэш. – М. : Колос, 1981. – 311 с.

210. Огнев, А. П. Гигиена сельскохозяйственных животных / А. П. Огнев, И. Ф. Храбустовский, В. И. Черных. – М. : Колос, 1984. – 400 с.

211. ОНТП-6-86. Общесоюзные нормы технологического проектирования зданий и сооружений для хранения и переработки картофеля и плодоовощной продукции. – М. : Минплодовощхоз СССР, 1986. – 40 с.

212. Определение требуемых теплозащитных качеств наружных ограждений теплого чердака : научно-технический отчет МНИИТЭП ГлавАПУ. - М. : [б.и.], 1970. – 44 с.

213. Определение эксплуатационных свойств теплых чердаков в условиях Северного Кавказа : научно-технический отчет ЦНИИЭП жилища. - М. : [б.и.], 1977. – 22 с.

214. Опхюз, Б. Влияние интенсивности вентиляции на потери веса картофеля в вентилируемых картофелехранилищах / Б. Опхюз // Сельское хозяйство за рубежом. – 1958. – № 11. – С. 114-128.

215. Перехоженцев, А. Г. Потенциал переноса влаги влажных капиллярно-пористых материалов / А. Г. Перехоженцев // Известия вузов. Строительство. – 1992. – № 2. – С. 101-104.

216. Пирог, П. И. Теплоизоляция холодильников / П. И. Пирог. – М. : Пищевая промышленность, 1966. – 272 с.

217. Плешков, Б. П. Биохимия сельскохозяйственных растений / Б. П. Плешков. – М. : Колос, 1980. – 495 с.

218. Плященко, С. И. Предупреждение стрессов у сельскохозяйственных животных / С. И. Плященко, В. Т. Сидоров. – Минск : Ураджай, 1983. – 136 с.

219. Повышение качества и эффективности использования кормов / [В. Г. Игловиков и др.] ; под ред. М. А. Смурыгина. – М. : Колос, 1983. – 317 с.

220. Позин Г. М. Математическая модель тепловлажностных процессов в помещениях для хранения сельскохозяйственной продукции / Г. М. Позин, О. Б. Аюрова // Известия вузов. Строительство. – 1999. – № 10. – С. 62 – 67.

221. Позин, Г. М. Определение количества приточного воздуха для производственных помещений с механической вентиляцией : метод. рекомендации. – Л. : ВНИИОТ, 1983. – 59 с.

222. Позин, Г. М. Основы расчета тепловоздушного режима промышленных и сельскохозяйственных зданий / Г. М. Позин // Современные проблемы вентиляции и экологической безопасности промышленных и сельскохозяйственных зданий : матер. науч.-техн. конф. - СПб : ДНТП АВОК. – 1992. – С. 41 – 51.

223. Поляков, А. Х. Проектирование вентиляции тоннелей / А. Х. Поляков. – М. : Стройиздат, 1971. – 145 с.

224. Посохин, В. Н. Аэродинамика вентиляции / В. Н. Посохин. – М. : АВОК-ПРЕСС, 2008. – 209 с.

225. Приточные устройства и аксессуары : Рекомендации по применению. – М. : АО «АЭРЭКО», 2015. – 21 с.

226. Проведение исследования условий снижения теплозащиты наружных ограждений теплого чердака жилых домов различной этажности с покрытием без рулонной кровли и подготовить рекомендации по расчету минимальной теплозащиты ограждающих конструкций : научно-технический отчет ЦНИИЭП жилища. - М. : [б.и.], 1978. – 66 с.

227. Пятрушявичус, В. И. Активное вентилирование травяных кормов / В. И. Пятрушявичус, В. Н. Любарский. – Л. : Агропромиздат, 1986. – 96 с.

228. Р НП АВОК 5.2-2012. Технические рекомендации по организации воздухообмена в квартирах жилых зданий. – М. : АВОК-ПРЕСС, 2012. – 26 с.

229. Разработка руководства по проектированию вытяжной вентиляции с естественным побуждением для жилых зданий по каталогу : научно- технический отчет МНИИТЭП ГлавАПУ. - М. : [б.и.], 1979. – 23 с.

230. Раяк, М. Б. Естественная вентиляция коровников с электронагревом воздуха / М. Б. Раяк, В. А. Шмидт, В. И. Родин // Животноводство. – 1982 – № 6. – С. 52-53.

231. Реттер Э. И. Аэродинамика зданий : учебник / Э. И. Реттер, С. И. Стриженов. – М. : Стройиздат, 1984. – 294 с.

232. Реттер, Э. И. Архитектурно-строительная аэродинамика / Э. И. Реттер. – М. : Стройиздат, 1984. – 296 с.

233. Рослов, Н. Н. Новое в хранении картофеля и овощей / Н. Н. Рослов. – М. : [б.и.], 1979. – 95 с.

234. Рубинэ, М. Кондиционирование воздуха в подземных сооружениях : пер. с фр. / М. Рубинэ ; под ред. В. С. Гусева. – М. : Госстройиздат, 1963. – 215 с.

235. Руководство по расчету влажностного режима ограждающих конструкций зданий / Госстрой СССР, НИИСФ ; В. И.Лукьянов [и др.]. – М. : Стройиздат, 1984. – 168 с.

236. Руководство пользователя оконными и стеновыми приточными устройствами. – М. : АО «АЭРЭКО», 2013. – 4 с.

237. Рымкевич, А. А. О единстве метода оптимизации систем микроклимата для промышленных и сельскохозяйственных объектов / А. А. Рымкевич // Современные проблемы вентиляции и экологической безопасности пром. и с.-х. зданий. – СПб, 1992. – С. 20-22.

238. Рымкевич, А. А. Системный анализ оптимизации общеобменной вентиляции и кондиционирования воздуха / А. А. Рымкевич . – М. : Стройиздат, 1990. – 292 с.

239. Рысин, С. А. Вентиляционные установки машиностроительных заводов : справочник / С. А. Рысин. - 3-е изд. – М. : Машиностроение, 1964. – 704 с.

240. Сайфутдинова, А. М. Особенности естественного воздухообмена жилых помещений / А. М. Сайфутдинова, В. Н. Куприянов // Academia. Архитектура и строительство. – 2009. – № 5. – С. 319-325.

241. Сакун, В. А. Сушка и активное вентилирование зерна и зеленых кормов / В. А. Сакун. – М. : Колос, 1974.– 216 с.

242. Саппанен, О. Вентиляция, качество внутреннего воздуха и эффективность потребления энергии / О. Саппанен // АВОК. – 2005. – № 3. – С. 10-18.

243. Светозаров, В. В. Основы статистической обработки результатов измерений / В. В. Светозаров. – М. : Изд-во МИФИ, 1983. – 40 с.

244. Светозаров, В. В. Элементарная обработка результатов измерений / В. В. Светозаров. – М. : Изд-во МИФИ, 1983. – 52 с.

245. Севернев, М. М. Энергосберегающие технологии в сельском хозяйстве / М. М. Севернев. – М. : Колос, 1992. – 190 с.

246. Серебровский, Ф. Л. Аэрация жилой застройки / Ф. Л. Серебровский. – М. : Стройиздат, 1971. – 112 с.

247. Сизенко, О. А. 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.

248. Сизенко, О. А. Совершенствование методики расчета систем естественной вентиляции жилых зданий с теплыми чердаками : дис. … канд. техн. наук : 05.23.03 / Сизенко Ольга Александровна. – Тольятти, 2009. – 156 с.

249. Системы отопления и обогрева газовыми инфракрасными излучателями // Журнал АВОК. – 2004. – № 1. – С. 30-31.

250. Сканави, А. Н. Вентиляция зданий повышенной этажности / А. Н. Сканави // Жилищное строительство. – 1970. – № 2.– С. 28-31.

251. СНиП 2.01.01-82. Строительная климатология и геофизика : утверждены постановлением Гос. ком. СССР по строительству и инвестициям от 11.06.99. - Взамен СНиП 2.01.01-82 / Минстрой России; введены 2000.01.01. - М. : ГП ЦПП, 1999. – 140 с.

252. СНиП 23-01-99*. Строительная климатология / Госстрой России. - М. : ГУП ЦПП, 1999. – 65 с.

253. СНиП 32-04-97. Тоннели железнодорожные и автодорожные : строит. нормы и правила Рос. Федерации : приняты и введены от 29.07.97. - Взамен СНиП II-44-78, СНиП III-44-77 / Госстрой России ; введены 1998.01.01. – М. : ГУП ЦПП, 1997. – 20 с.

254. СНиП II-А.7-71. Строительная теплотехника : нормы проектирования. – М. : Госстрой СССР, 1973. – 31 с.

255. Сорочинский, В. Сравнительная оценка технологий конвективной сушки зерна / В. Сорочинский // Комбикорма. – 1999. – № 4. – С. 18-20.

256. СП 105.13330.2012. Здания и помещения для хранения и переработки сельскохозяйственной продукции. Актуализированная редакция СНиП 2.10.02-84 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://docs.cntd.ru/document/1200095538

257. СП 109.13330.2012. Холодильники. Актуализированная редакция СНиП 2.11.02-87 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://docs.cntd.ru/document/1200092603

258. СП 120.13330.2012. Метрополитены. Актуализированная редакция СНиП 32-02-2003 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://docs.cntd.ru/document/1200095542

259. СП 122.13330.2012. Тоннели железнодорожные и автодорожные. Актуализированная редакция СНиП 32-04-97 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://docs.cntd.ru/document/1200095544

260. СП 131.13330.2012. Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://docs.cntd.ru/document/1200095546

261. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003. – М. : ФАУ «ФЦС», 2012. – 95 с.

262. СП 54.13330.2011. Здания жилые многоквартирные. Актуализированная редакция СНиП 31–01–2003 : утв. М-вом регион. развития Рос. Федерации 24.12.2010 : дата введ. 20.05.2011. – Москва : Минрегион России, 2011. – 29 с.

263. СП 60.13330.2012. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Актуализированная редакция СНиП 41–01–2003 : утв. М-вом регион. развития Рос. Федерации 30.06.2012 : дата введ. 01.01.2013. – Москва : Минрегион России, 2012. – 62 с.

264. Спирин, Н. А. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента / Н. А. Спирин, В. В. Лавров. – Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. – 257 с.

265. Справочник проектировщика промышленных, жилых и общественных зданий и сооружений. Ч. 2. Вентиляция и кондиционирование воздуха (внутренние санитарно-технические устройства) / под общ. ред. И. Г. Староверова ; [авт.-сост. В. Н. Талиев и др.]. – М. : Стройиздат, 1969. – 536 с.

266. Старостин, Е. Г. Экономия теплоты в зданиях за счет оптимизации воздухообмена / Е. Г. Старостин, В. И. Скрябин // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. – 2007. – Т. 4. – № 2. – С. 53-57.

267. Сухов, В. В. Формирование параметров микроклимата в подземных пешеходных переходах : дис. … канд. тех. наук : 05.23.03 / Сухов Вячеслав Васильевич. – Нижний Новгород, 2009. – 194 с.

268. Сушка сена активным вентилированием // Степные просторы. – 1990. – т. 1. - С. 35.

269. Табунщиков, Ю. А. Энергоэффективные здания / Ю. А. Табунщиков, М. М. Бродач, Н. В. Шилкин. – М. : АВОК-ПРЕСС, 2003. – 200 с.

270. Талиев, В. Н. Аэродинамика вентиляции / В. Н. Талиев. – М. : Стройиздат, 1979. – 295 с.

271. Таурит, В. Р. Численное и аналитическое решения двухмерной задачи нестационарного теплообмена при вентиляции насыпного слоя / В. Р. Таурит // Вестник гражданских инженеров. – 2012. – № 5 (34). – С. 169-172.

272. Тертичник, Е. И. Определение влажностных характеристик строительных материалов способом разрезной колонки / Е. И. Тертичник // Инж.-физ. журнал. – 1965. – т. 8. – № 12. – С. 247-250.

273. Тертичник, Е. И. Шкала потенциала влажности для изотермических и неизотермических условий влагопередачи / Е. И. Тертичник // Некоторые вопросы теплового режима зданий : сб. науч. тр. МИСИ. – 1967. – № 52. – С. 55-60.

274. Тертичник, Е. И. Шкала потенциала влажности для расчетов влагопередачи при отрицательных температурах / Е. И. Тертичник // Теплоснабжение и вентиляция : сб. науч. тр. МИСИ. – 1977. – № 144. – С. 86-93.

275. Титов, В. П. Воздушный режим здания : дис. … д-ра техн. наук. – М., 1987. – 46 с.

276. Титов, В.П. Курсовое и дипломное проектирование по вентиляции гражданских и промышленных зданий: учебное пособие для вузов / В.П. Титов, Э.В. Сазонов, Ю.С. Краснов, В.И. Новожилов. – М.: Стройиздат, 1985. – 208 с.

277. Тоннели и метрополитены : учебник / под ред. В. Г. Храпова. – М. : Транспорт, 1989. – 383 с.

278. Ушков, Ф. В. Метод расчета увлажнения ограждающих частей зданий / Ф. В. Ушков. – М. : МКХ РСФСР, 1955. – 104 с.

279. Фальковский, И. М. Сушка и увлажнение лубоволокнистых материалов / И. М. Фальковский. – М. : Гизлегпром, 1954. – 403 с.

280. Фиалковская, Т. А. Вентиляция при окрашивании изделий / Т. А. Фиалковская, И. С. Середнева. – М. : Машиностроение, 1986. – 152 с.

281. Фокин, К. Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / К. Ф. Фокин. – М. : АВОК-ПРЕСС, 2006. – 256 с.

282. Франчук А. У. Определение сорбционной влажности строительных материалов / А. У. Франчук // Исследования по строительной физике : сб. науч. тр. ЦНИИПС – 1949. – № 3. – С. 163-192.

283. Франчук, А. У. Вопросы теории и расчета влажности ограждающих частей зданий / А. У. Франчук. – М. : Стройиздат, 1957. – 188 с.

284. Фрегер, Ю. Л. Рациональные методы подогрева воздуха при активном вентилировании сена / Ю. Л. Фрегер, Б. Я. Каменецкий, А. В. Карлаков // Тракторы и с.-х. машины. – 1989. – № 11. – С. 32-34.

285. Харитонов, В. П. Адсорбция в кондиционировании на холодильниках для плодов и овощей (теория применения) / В. П. Харитонов. – М. : Пищевая промышленность, 1978. – 192 с.

286. Харитонов, В. П. Естественная вентиляция с побуждением / В. П. Харитонов // АВОК. – 2006. – № 3. – С. 46-55

287. Холмквист, А. А. Хранение картофеля и овощей / А. А. Холмквист. – Л. : Колос, 1972. – 280 с.

288. Цирулик, А. Я. Планирование эксперимента в электромашиностроении : учеб. пособие / А. Я. Цирулик. – Куйбышев : КуАИ, 1983. – 43 с.

289. Цодиков, В. Я. Вентиляция и теплоснабжение метрополитенов / В. Я. Цодиков. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Недра, 1975. – 568 с.

290. Чайковский, В. С. О тепловлажностных процессах в камерах холодильников / В. С. Чайковский, Е. Г. Кротов // Холодильная техника. – 1980. – № 9. – С. 45.

291. Чижов, Г. Б. Теплофизические процессы в холодильной технологии пищевых продуктов / Г. Б. Чижов. – М. : Пищевая промышленность, 1979. – 271 с.

292. Чиркова, Е. В. Обеспеченность теплофизических характеристик наружных ограждений неотапливаемых сельскохозяйственных зданий : дис. … канд. тех. наук : 05.23.03 / Чиркова Елена Владимировна. – Тольятти, 2015. – 219 с.

293. Чуклин, С. Г. Современные холодильники для хранения фруктов / С. Г. Чуклин, И. Г. Чумак, В. Ф. Файнзимберг. – Кишинев : Картя Молдаваняске, 1970. – 171 с.

294. Шагинян, К. С. Системы вентиляции гражданских зданий. Проблемы и новые способы их решения / К. С. Шагинян, А. Ю. Окунев // Academia. Архитектура и строительство. – 2010. – № 3. – С. 530-537.

295. Широков, Е. П. Биологические особенности кочанной капусты как основа разработки новой технологии ее хранения с применением активного вентилирования : автореф. дис. … д-ра сельскохозяйственных наук : 05.375 / Широков Евгений Петрович. – М., 1971. – 39 с.

296. Широков, Е. П. Охлаждение капусты и картофеля при активном вентилировании / Е. П. Широков // Доклады ТСХА. – 1963. – вып. 93. – С. 217-221.

297. Широков, Е. П. Технология хранения и переработки плодов и овощей / Е. П. Широков. – М. : Колос, 1978. – 310 с.

298. Шкловер, А. М. Основы строительной теплотехники жилых и общественных зданий / А. М. Шкловер, Б. Ф. Васильев, Ф. В. Ушков. – М. : Госстройиздат, 1956. – 350 с.

299. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. – М. : Физматгиз, 1972. – 711 с.

300. Шуев, И. С. Расчет интенсивности и времени вентилирования насыпи моркови и столовой свеклы в период охлаждения / И. С. Шуев // Тр. Гипронисельпрома. – 1976. – вып. 7. – С. 163-164.

301. Щекин, Р. В. Справочник по теплоснабжению и вентиляции в гражданском строительстве / Р. В.Щекин [и др.]. – Киев : Гос. изд-во лит. по стр-ву и архитектуре УССР, 1962. – 1020 с.

302. Эльтерман, В. М. Вентиляция химических производств / В. М. Эльтерман. – М. : Машиностроение, 1980. – 284 с.

303. Эпштейн, А. С. Расчет конденсационного увлажнения конструкций / А. С. Эпштейн // Проект и стандарт. – 1936. – № 11. – С. 10-14.

304. Юргенсон, Л. К. Расчет режима животноводческих помещений с учетом тепла искусственного отопления / Л. К. Юргенсон // Сб. науч. тр. ТПИ. – Таллин : ТПИ, 1960. – 32 с.

305. Brunauer S. On a theory of the van der Waals adsorption of gases / S. Brunauer, L. S. Deming, E. J. Teller // J. Am. Chem. Soc. - 1940. - Vol. 62. - P. 172.

306. Brunauer S. Adsorption of gases in multimolekular layers / S. Brunauer, P. H. Emmet, E. J. Teller // J. Am. Chem. Soc. - 1938. - Vol. 60. - P. 309-319.

307. Burton W. G. The basic principles of potato storage practiced in Great Britain / W. G. Burton // European Potato Journal. – 1973. - № 6. – P. 77-92.

308. Gertis K. Zur praktischen Aussagekraft von Feuchtemessimgen bei Baustoffen / K. Gertis // Technologic und Anwendung der Baustoffe. – Berlin, 1992. – S. 1-7.

309. Glaser H. Die Brauchbarkeit des graphischen Verfahrens nach DIN 4108 zur Untersuchung von Diffiisionsvorgangen / H. Glaser // Warmeschutz-Kaltechutz-Schallchutz-Brandchutz. – Sonderausgabe, 1985. – S. 42-49.

310. Glaser H. Grafisches Verfahren zur Untersuchung von Diffiisionsvorgangen / H. Glaser // Ibid. - 1959. – Jg. 11. – H. 10. – S. 345-349.

311. Gunzel W. Ergebnisse der Untersuchungen zur Beluftung ein- und zwei kanal- igen Grossmiten fur Kartoffeln / W. Gunzel // Agratechnik. – 1980. - Jg. 30. - H. 80. – S. 351-354.

312. Haupl P. Zur Einflub der Schwerkraft auf den verticalen Feuchtetransport / P. Haupl, H. Stopp // Ibid. – 1988. – Heft 28. – S. 105-126.

313. Hendrix T. Heat Generated in Chopped Hay and its Relation to the Drying Effect / T. Hendrix // Agricultural Engineering. – 1947. – № 7. – P. 286-288.

314. Hugel C. Lagerbeluftungstrocknung von Getreide / C. Hugel, T. Jungbluth, G. Hofmann // Landtechnik. – 1993. – Jg. 48. - № 7. – S. 70-372.

315. Hunter J. H. A simulation model for potato storage ventilation / J. H. Hunter // ASAE. - Technical paper № 78-4061. – P. 29.

316. Hylmo B., et al. The heat balance in a potato pile. //Acta Agricultural Scandinavica.V. XXV, №2. , 1975– P. 81-87

317. Hylmo B. Potato storage in Sweden / B. Hylmo, A. Johansson, G. Wikberg // Research and Practice. ASAE and CSAE. – 1979.

318. Juga G. A new adsorption isotherm which is valid over a very wide range of pressure / G. Juga, W. Harkins, J. Chem // Phys. - 1943. - Vol. 11. - № 9. - P. 430-431.

319. Kieβl K. Kapillarer und dampfformiger Feuchtetransport in mehrschitigen Bauteilen / K. Kieβl : dissertation Universitat-Gesamthochschule Essen. – Germanien, 1983. – 28 p.

320. Kieβl K. Feuchtetransport in Baustoffen / K. Kieβl, K. Gertis // Eine Literaturauswertung zur rechnerischen Erfassung hygrischer Transportphanomene / Universitat Essen Gesamthochschule. Forschungsberichte uas dem Fachbereich Bauwesen. – 1980. - № 13.

321. Koppen D. Neue Ergebnisse bie der Einfuhrung der zweikanaligen Grossmieten / D. Koppen // Feldwirtschaft. – 1981. - Jg. 22. - H. 7. – S. 294-297.

322. Kunzel H. Gasbeton. Warme – und Feuchtigkeitsverhalten (Aerated Concrete. Heat and moisture Aspect) / H. Kunzel // Bauverlag GmbH. - Wiesbaden ; Berlin. - 1971. - S. 25.

323. Kunzel H. M. Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components / H. Kunzel. – Stuttgart : IRB-Verlag, 1995.

324. Kunzel H. Berechnung des zweidimensionalen, nichtisothermen Feuchtetransports in mehrschichtigen Bauteilen mit einfachen Speicher- und Transportfimktionen und bauphysikalische Anwendung / H. Kunzel : dissertation. – Stuttgart, 1994.

325. Lerew L. E. Storage of potatoes a simulation model / L. E. Lerew, F.W. Bakker–Arkema. - [s. 1. : s. n.], 1978. – 24 p.

326. Lindsay R. T. Ventilation Rates for the Positive Ventilation of Vegetables in Bulk Bins / R. T. Lindsay, M. A. Neale, H. J. M. Messer // J. Agric. Engng. Res. – 1983. - № 28. – P. 33-44.

327. Lingwall P. Efficient hay systems / P. Lingwall, E. Nillsson // Proc : Of Conf. on Forage Conservation on the 80’s. Maidenhead. – Berkshire, 1980. – P. 175-180.

328. Miller L. G. Calculating Vapor and Heat Transfer Through Walls / L. G. Miller // Heat. Ventil. - 1938. – Vol. 35. – № 11. – P. 56-58.

329. Misener G. M. Simulated moisture loss and cooling time for bulk potatoes / G. Misener, M. Mac Donald // Canad. Agr. Eng. – 1975. – Vol. 17. – P. 72-74.

330. Misener G. C. Moisture Loss from Kennebec Potato Tubers During Initial Storage Period / G. C. Misener, G. C. Shove // Transaction of the ASAE. – 1976. - Vol. 19. - № 15, Sept.–Oct. – P. 967-969.

331. Misener G. C. Moisture Loss from Kennebec Potato Tubers During Initial Storage Period / G. C. Misener, G. C. Shove // Transaction of the ASAE. - Vol. 19. - № 15. - Sept.–Oct. – P. 967-969.

332. Nellist M. E. Near-ambient grain drying / M. E. Nellist // Agr. Engr. – 1988. – T. 43. - № 3. – P. 93-101.

333. Schwarz B. Kapillare Wasseraufnahme von baustoffen / B. Schwarz // Gesundheits-ingenieur 1972. – Bol. 93. - № 7 – S. 206-211.

334. Segler G. Stand der Heubeluftungstechnik / G. Segler // Landtechnik. – 1967. – № 8.

335. Sparcs W. C. Modern storage methods reduce losses / W. C. Sparcs // American Vegetable Grower. – 1971. - Vol. 18. - № 10. – P. 32-35.

336. Teesdale L. V. How to Overcome Condensation in Building Walls and Attics / L. V. Teesdale // Heat. Ventil. - 1939. – Vol. 36. – № 4. – P. 36-40.

337. Van Ouwerkerk E. N. Bewaarpaatsisolate / E. N. Van Ouwerkerk // Landbouwmechanisate. - 1978. - Vol. 29. - № 7. – P. 795-796.

338. Vogt C. Silage- und Heuernte durch Lohnunternehmer / C. Vogt // Lohnunternehmen in Land-Forwirtsch. – 1981. – Vol 36. - № 5. – S. 272-276.

339. Wilkinson R. H. Respiration Heat of Harvested Forage / R. H. Wilkinson, C. W. Hall // Transactions of the ASAE. – 1966. – № 3.

340. Wood D. Системы вентиляции дорожных тоннелей (опыт Великобритании) / D. Wood // АВОК. – 2007. – № 2. – С. 40-42.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Конструктивные характеристики системы вытяжной естественной вентиляции девятиэтажного жилого дома

№ п/п	Наименование параметра	Обозначение	Ед. изм.	Значение
1	2	3	4	5
1.	Высота вентиляционной шахты	$h_ш$	м	3
2.	Высота чердачного помещения	$h_ч$	м	1,7
3.	Размеры поперечного сечения шахты	AxB	м	1,1x1,2
4.	Высота вентиляционного оголовка	$h_о$	м	0,6
5.	Размер большего поперечного сечения сборного канала	axd	м	0,565x0,17
6.	Размер меньшего поперечного сечения сборного канала	bxd	м	0,415x0,17
7.	Размер поперечного сечения бокового канала	cxd	м	0,115x0,17
8.	Высота этажа, включая межэтажное перекрытие	h	м	2,7
9.	Размер вентиляционной решетки	CxD	м	0,12x0,2
10.	Коэффициент трения	λ	-	0,025155
11.	Сумма коэффициентов местных сопротивлений на преодоление вентиляционной решетки и входа в боковой канал	$\Sigma\zeta_1$	-	2,8
12.	Сумма коэффициентов местных сопротивлений на преодоление входа в вентиляционную шахту и выброса воздуха в атмосферу	$\Sigma\zeta_2$	-	1,6

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Результаты натурных исследований работы систем естественной вентиляции

Условия замеров: $t_н$ = +2 ºС; $t_ч$ = +17,9 ºС; окна закрыты

Параметры	Этаж								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Санузел									
$t_в$, ºС	24,1	23,7	23,9	23,6	24,1	23,7	24,1	23,8	24,3
	24,2	23,7	23,9	23,5	24,1	23,8	24,2	23,8	24,2
	24,2	23,7	23,9	23,6	24,1	23,8	24,2	23,8	24,2
	24,2	23,7	23,9	23,6	24,1	23,8	24,2	23,7	24,2
	24,3	23,6	23,9	23,6	24,2	23,8	24,2	23,8	24,2
$t_{ср}$, ºС	**24,2**	**23,7**	**23,9**	**23,6**	**24,1**	**23,8**	**24,2**	**23,8**	**24,2**
$v_{реш}$, м/с	0,24	0,21	0,19	0,15	0,17	0,19	0,21	0,2	0,16
	0,23	0,2	0,22	0,14	0,17	0,19	0,19	0,2	0,17
	0,25	0,2	0,22	0,14	0,2	0,19	0,2	0,2	0,17
$v_{ср}$, м/с	0,24	0,2	0,21	0,14	0,18	0,19	0,2	0,2	0,17
$L_{ср}$, м^3/ч	**53**	**45**	**48**	**33**	**41**	**42**	**46**	**44**	**39**
Кухня									
$t_в$, ºС	23,6	23,1	23,4	23,0	23,4	22,9	23,9	23,1	23,4
	23,5	23,1	23,3	23,0	23,5	22,8	23,9	23,1	23,5
	23,5	23,1	23,4	23,0	23,5	22,8	23,9	23,1	23,5
	23,5	23,1	23,4	23,0	23,5	22,8	23,9	23,1	23,5
	23,4	23,1	23,4	23,1	23,5	22,8	24,0	23,1	23,5
$t_{ср}$, ºС	**23,5**	**23,1**	**23,4**	**23,0**	**23,5**	**22,8**	**23,9**	**23,1**	**23,5**
$v_{реш}$, м/с	0,32	0,24	0,39	0,3	0,26	0,24	0,27	0,33	0,32
	0,33	0,24	0,38	0,26	0,26	0,23	0,26	0,32	0,35
	0,33	0,26	0,37	0,26	0,26	0,24	0,28	0,32	0,39
$v_{ср}$, м/с	0,33	0,25	0,38	0,28	0,26	0,24	0,27	0,32	0,35
$L_{ср}$, м^3/ч	**74**	**57**	**85**	**64**	**58**	**55**	**61**	**71**	**79**

Продолжение приложения 2

Условия замеров: $t_н$ = –1 ºС; $t_ч$ = +17,5 ºС; окна закрыты

Параметры	Этаж								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Санузел									
$t_в$, ºС	23,2	23,0	23,3	22,9	23,5	22,8	23,4	23,0	23,7
	23,2	23,0	23,2	22,8	23,5	22,9	23,4	23,1	23,6
	23,2	23,0	23,2	22,8	23,4	22,9	23,4	23,1	23,6
	23,2	23,0	23,2	22,8	23,5	22,9	23,4	23,1	23,6
	23,1	23,0	23,2	22,8	23,5	23,0	23,4	23,1	23,6
$t_{ср}$, ºС	**23,2**	**23,0**	**23,2**	**22,8**	**23,5**	**22,9**	**23,4**	**23,1**	**23,6**
$v_{реш}$, м/с	0,26	0,2	0,21	0,14	0,16	0,19	0,22	0,2	0,18
	0,25	0,21	0,21	0,11	0,15	0,19	0,22	0,22	0,2
	0,25	0,2	0,21	0,11	0,16	0,2	0,22	0,22	0,19
$v_{ср}$, м/с	0,25	0,2	0,21	0,13	0,16	0,19	0,22	0,22	0,19
$L_{ср}$, м^3/ч	**56**	**45**	**48**	**29**	**37**	**43**	**50**	**49**	**42**
Кухня									
$t_в$, ºС	22,6	22,3	22,4	22,1	23,1	22,2	22,8	22,2	23,0
	22,6	22,4	22,5	22,1	23,0	22,2	22,6	22,2	22,9
	22,6	22,4	22,5	22,1	23,0	22,2	22,8	22,2	22,9
	22,6	22,4	22,5	22,1	23,0	22,2	22,8	22,2	22,9
	22,7	22,4	22,5	22,1	23,0	22,3	22,9	22,2	22,9
$t_{ср}$, ºС	**22,6**	**22,4**	**22,5**	**22,1**	**23,0**	**22,2**	**22,8**	**22,2**	**22,9**
$v_{реш}$, м/с	0,33	0,23	0,38	0,32	0,26	0,26	0,3	0,42	0,38
	0,34	0,22	0,4	0,32	0,25	0,26	0,3	0,42	0,39
	0,34	0,23	0,39	0,32	0,26	0,27	0,3	0,42	0,4
$v_{ср}$, м/с	0,34	0,23	0,39	0,32	0,26	0,26	0,3	0,42	0,38
$L_{ср}$, м^3/ч	**76**	**52**	**88**	**73**	**58**	**58**	**68**	**94**	**85**

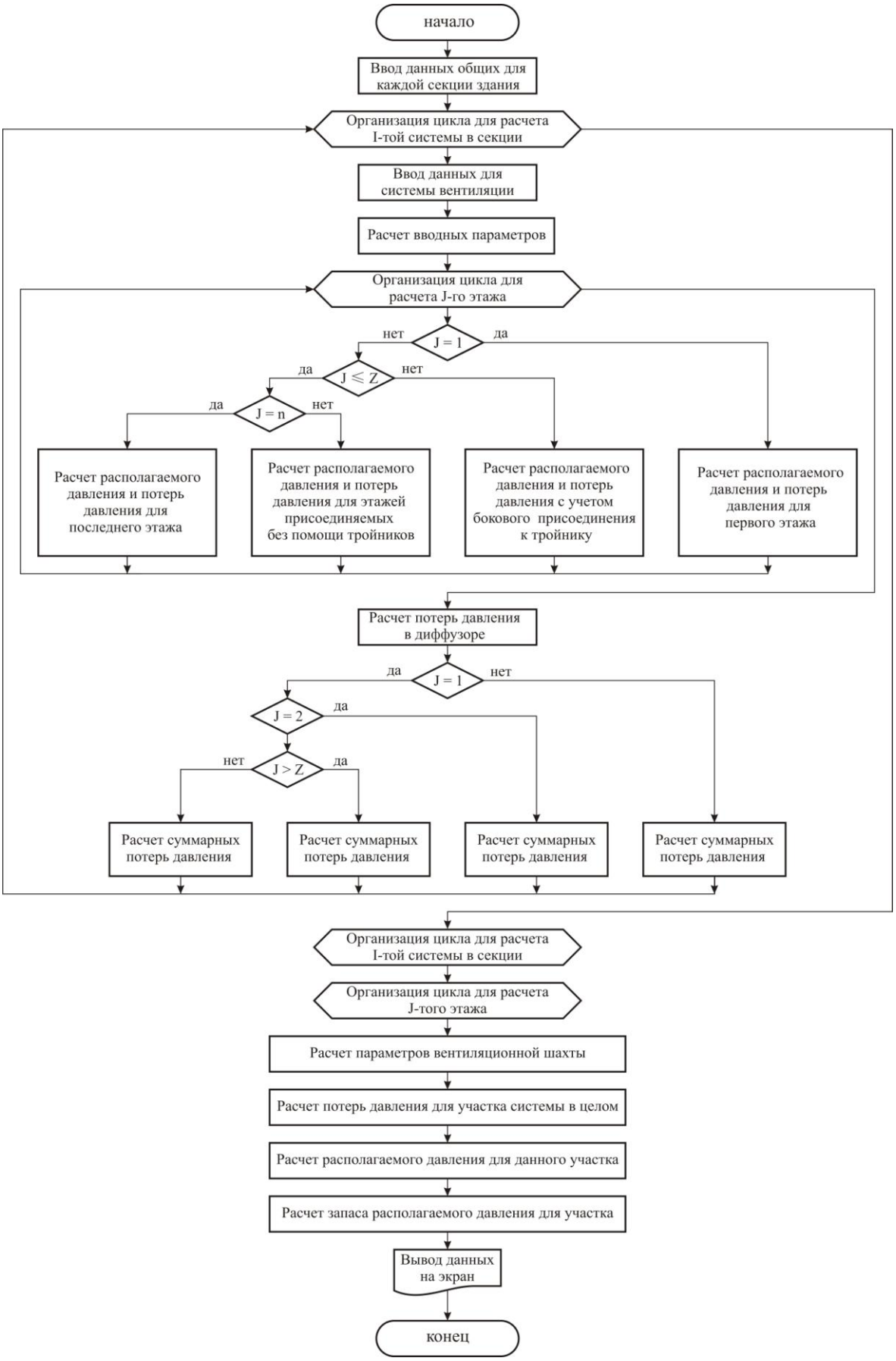
Продолжение приложения 2

Условия замеров: $t_н$ = –5 ºС; $t_ч$ = +16,9 ºС; окна закрыты

Параметры	Этаж								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Санузел									
$t_в$, ºС	23,0	23,2	23,1	22,6	22,6	22,9	22,8	22,3	23,0
	23,0	23,2	23,1	22,6	22,6	22,9	22,8	22,3	23,0
	23,0	23,2	23,1	22,6	22,6	22,9	22,8	22,3	23,0
	23,0	23,2	23,1	22,6	22,6	22,9	22,8	22,3	23,0
	23,0	23,2	23,1	22,6	22,6	22,9	22,8	22,3	23,0
$t_{ср}$, ºС	**23,0**	**23,2**	**23,1**	**22,6**	**22,6**	**22,9**	**22,8**	**22,3**	**23,0**
$v_{реш}$, м/с	0,25	0,21	0,24	0,18	0,18	0,19	0,21	0,22	0,17
	0,25	0,22	0,24	0,17	0,19	0,18	0,21	0,22	0,16
	0,24	0,22	0,24	0,17	0,18	0,18	0,22	0,22	0,17
$v_{ср}$, м/с	0,25	0,22	0,24	0,17	0,18	0,18	0,21	0,22	0,17
$L_{ср}$, м^3/ч	**57**	**49**	**54**	**39**	**40**	**41**	**47**	**50**	**39**
Кухня									
$t_в$, ºС	22,7	22,8	22,8	22,0	22,1	22,4	22,2	21,8	22,6
	22,7	22,8	22,7	22,0	22,1	22,3	22,2	21,8	22,5
	22,7	22,8	22,7	22,0	22,0	22,3	22,2	21,8	22,5
	22,7	22,8	22,7	22,0	22,1	22,3	22,2	21,8	22,5
	22,7	22,7	22,7	22,0	22,1	22,3	22,3	21,8	22,5
$t_{ср}$, ºС	**22,7**	**22,8**	**22,7**	**22,0**	**22,1**	**22,3**	**22,2**	**21,8**	**22,5**
$v_{реш}$, м/с	0,35	0,25	0,41	0,33	0,26	0,23	0,27	0,33	0,35
	0,35	0,26	0,42	0,32	0,26	0,24	0,27	0,33	0,35
	0,35	0,26	0,43	0,33	0,27	0,24	0,28	0,32	0,35
$v_{ср}$, м/с	0,35	0,26	0,42	0,33	0,26	0,24	0,27	0,33	0,35
$L_{ср}$, м^3/ч	**79**	**59**	**94**	**75**	**58**	**54**	**60**	**75**	**78**

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Блок-схема автоматизированного аэродинамического расчета



ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Результаты сглаживания экспериментальных значений расходов воздуха в тоннеле перехода

Угол обдува α, град	Скорости воздуха *v*, м/с							Расходы воздуха, м^3/ч											
	№№ точек замеров							L_1	L_2	L_3	$L_T^{ср}$	L_4	L_5	$L_{вх}$	L_6	L_7	$L_{вых}$	L'	$L'_{ср}$
	1	2	3	4	5	6	7												
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Режим I (без дросселирования, диаметр всасывающего патрубка 1000 мм)																			
0 (А)	0,46	0,53	0,46	0,42	0,41	0,51	0,52	0,745	0,859	0,7452	0,783	0,4536	0,4428	0,896	0,5508	0,562	1,112	1,01	
	0,58	0,58	0,56	0,38	0,56	0,52	0,57	0,94	0,94	0,9072	0,929	0,4104	0,6048	1,015	0,5616	0,616	1,177	1,001	1,001
	0,65	0,62	0,57	0,49	0,55	0,53	0,58	1,053	1,004	0,9234	0,994	0,5292	0,594	1,123	0,5724	0,626	1,199	0,991	
30 (Б)	0,63	0,65	0,56	1,8	–0,72	–0,75	1,45	1,021	1,053	0,9072	0,994	1,944	–0,778	1,166	–0,81	1,566	0,756	0,975	
	0,55	0,65	0,46	1,65	–0,55	–0,64	1,33	0,891	1,053	0,7452	0,896	1,782	–0,594	1,188	–0,691	1,436	0,745	0,948	0,944
	0,58	0,55	0,51	1,6	–0,65	–0,6	1,39	0,94	0,891	0,8262	0,886	1,728	–0,702	1,026	–0,648	1,501	0,853	0,908	
45 (В)	0,52	0,44	0,6	1,75	–0,72	–0,58	1,08	0,842	0,713	0,972	0,842	1,89	–0,778	1,112	–0,627	1,166	0,54	0,859	
	0,5	0,58	0,52	1,5	–0,65	–0,62	1,25	0,81	0,94	0,8424	0,864	1,62	–0,702	0,918	–0,67	1,35	0,680	0,808	0,808
	0,58	0,55	0,59	1,6	–0,75	–0,6	1,2	0,94	0,891	0,9558	0,929	1,728	–0,81	0,918	–0,648	1,296	0,648	0,758	
60 (Г)	0,5	0,4	0,49	1,65	–1,2	–0,77	1,32	0,81	0,648	0,7938	0,751	1,782	–1,296	0,486	–0,832	1,426	0,594	0,708	
	0,47	0,45	0,51	1,38	–1,05	–0,8	1,35	0,761	0,729	0,8262	0,772	1,4904	–1,134	0,356	–0,864	1,458	0,594	0,664	0,664
	0,52	0,45	0,47	1,9	–1,15	–0,77	1,3	0,842	0,729	0,7614	0,778	2,052	–1,242	0,81	–0,832	1,404	0,572	0,62	
90 (Д)	0,05	–0,15	-0,1	1,15	–1,29	1,1	–1,2	0,081	–0,24	–0,162	–0,11	1,242	–1,388	–0,146	1,188	–1,296	–0,108		
	0,03	0,1	0,11	1,25	–1	1,05	–1	0,049	0,162	0,1782	0,13	1,35	–1,08	0,27	1,134	–1,08	0,054		
	0,05	0,07	0,12	1,15	–1,05	1	–1,16	0,081	0,113	0,1944	0,13	1,242	–1,134	0,108	1,08	–1,253	–0,173		
Режим II (диаметр диафрагмы во всасывающем патрубке 835 мм)																			
0 (А)	0,58	0,63	0,62	0,52	0,56	0,51	0,55	0,94	1,021	1,0044	0,988	0,5616	0,6048	1,166	0,5508	0,594	1,145	1,124	
	0,61	0,57	0,58	0,54	0,6	0,53	0,47	0,988	0,923	0,9396	0,950	0,5832	0,648	1,231	0,5724	0,5076	1,08	1,029	1,029
	0,56	0,53	0,52	0,53	0,47	0,49	0,51	0,907	0,859	0,8424	0,869	0,5724	0,5076	1,08	0,5292	0,5508	1,08	0,934	
30 (Б)	0,6	0,44	0,41	1,45	–0,71	–0,61	1,15	0,972	0,713	0,6642	0,783	1,566	–0,767	0,799	–0,659	1,242	0,583	0,843	
	0,46	0,54	0,45	1,33	–0,58	–0,82	1,1	0,745	0,875	0,729	0,783	1,4364	–0,626	0,81	–0,886	1,188	0,302	0,764	0,770
	0,58	0,55	0,54	1,42	–0,61	–0,69	1,2	0,94	0,891	0,8748	0,902	1,5336	–0,659	0,875	–0,745	1,296	0,551	0,704	
45 (В)	0,49	0,49	0,38	1,2	–0,75	–0,6	1,05	0,794	0,794	0,6156	0,734	1,296	–0,81	0,486	–0,648	1,134	0,486	0,656	
	0,48	0,46	0,33	1,4	–0,8	–0,58	1,15	0,778	0,745	0,5346	0,686	1,512	–0,864	0,648	–0,626	1,242	0,616	0,628	0,635

Продолжение приложения 4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	0,47	0,47	0,36	1,35	–0,85	–0,62	1,2	0,761	0,761	0,5832	0,702	1,458	–0,918	0,54	–0,67	1,296	0,626	0,62	
60 (Г)	0,4	0,4	0,37	1,4	–1,2	–0,78	1,2	0,648	0,648	0,5994	0,632	1,512	–1,296	0,216	–0,842	1,296	0,454	0,625	
	0,38	0,42	0,42	1,8	–1	–0,79	1,24	0,616	0,680	0,6804	0,659	1,944	–1,08	0,864	–0,853	1,3392	0,486	0,637	0,637
	0,41	0,36	0,39	1,9	–0,96	–0,76	1,2	0,664	0,583	0,6318	0,626	2,052	–1,037	1,015	–0,821	1,296	0,475	0,649	
90 (Д)	0	0	0,04	1,62	–1,48	–0,37	0,65	0	0	0,0648	0,022	1,7496	–1,598	0,151	–0,4	0,702	0,302		
	0	0,09	0,07	1,2	–1,55	–0,6	0,49	0	0,146	0,1134	0,086	1,296	–1,674	–0,378	–0,648	0,5292	–0,119		
	0,02	0	0,04	1,2	–1,68	–0,75	0,85	0,032	0	0,0648	0,032	1,296	–1,814	–0,518	–0,81	0,918	0,108		
Режим III (диаметр диафрагмы во всасывающем патрубке 260 мм)																			
0 (А)	0,25	0,26	0,3	0,25	0,2	0,32	0,16	0,405	0,421	0,486	0,437	0,27	0,216	0,486	0,3456	0,1728	0,518	0,489	
	0,26	0,28	0,26	0,22	0,22	0,36	0,14	0,421	0,454	0,4212	0,432	0,2376	0,2376	0,475	0,3888	0,1512	0,54	0,432	0,432
	0,27	0,25	0,27	0,19	0,19	0,3	0,12	0,437	0,405	0,4374	0,427	0,2052	0,2052	0,410	0,324	0,1296	0,454	0,376	
30 (Б)	0,3	0,33	0,28	1,37	–0,82	–0,48	0,16	0,486	0,535	0,4536	0,491	1,4796	–0,886	0,594	–0,518	0,1728	–0,346	0,322	
	0,27	0,31	0,25	1,4	–0,9	–0,51	0,18	0,437	0,502	0,405	0,448	1,512	–0,972	0,54	–0,551	0,1944	–0,356	0,28	0,284
	0,29	0,28	0,27	1,32	–0,86	–0,52	0,2	0,47	0,454	0,4374	0,454	1,4256	–0,929	0,497	–0,562	0,216	–0,346	0,249	
45 (В)	0,27	0,28	0,24	1,5	–0,95	–0,48	0,21	0,437	0,454	0,3888	0,427	1,62	–1,026	0,594	–0,518	0,2268	–0,292	0,232	
	0,29	0,29	0,29	1,52	–1,1	–0,5	0,19	0,47	0,47	0,4698	0,47	1,6416	–1,188	0,454	–0,54	0,2052	–0,335	0,224	0,228
	0,26	0,27	0,27	1,6	–0,98	–0,49	0,2	0,421	0,437	0,4374	0,432	1,728	–1,058	0,67	–0,529	0,216	–0,313	0,227	
60 (Г)	0,26	0,27	0,25	1,6	–1,15	–0,47	0,18	0,421	0,437	0,405	0,421	1,728	–1,242	0,486	–0,508	0,1944	–0,313	0,229	
	0,28	0,26	0,27	1,62	–1,05	–0,45	0,19	0,454	0,421	0,4374	0,437	1,7496	–1,134	0,616	–0,486	0,2052	–0,281	0,232	0,232
	0,26	0,28	0,26	1,61	–1,1	–0,46	0,16	0,421	0,454	0,4212	0,432	1,7388	–1,188	0,551	–0,497	0,1728	–0,324	0,235	
90 (Д)	0	0	0	0,83	–0,62	–1	0,9	0	0	0	0	0,8964	–0,67	0,227	–1,08	0,972	–0,108		
	0	0	0	0,91	–0,56	–1	0,84	0	0	0	0	0,9828	–0,605	0,378	–1,08	0,9072	–0,173		
	0	0	0	0,87	–0,64	–1,05	0,86	0	0	0	0	0,9396	–0,691	0,249	–1,134	0,9288	–0,205		
Режим IV (диаметр диафрагмы во всасывающем патрубке 50 мм)																			
0 (А)	0,26	0,22	0,22	0,13	0,18	0,31	0,12	0,421	0,356	0,3564	0,378	0,1404	0,1944	0,335	0,3348	0,1296	0,464	0,421	
	0,24	0,2	0,19	0,13	0,23	0,28	0,12	0,389	0,324	0,3078	0,340	0,1404	0,2484	0,389	0,3024	0,1296	0,432	0,391	0,391
	0,21	0,24	0,23	0,15	0,19	0,3	0,13	0,340	0,389	0,3726	0,367	0,162	0,2052	0,367	0,324	0,1404	0,464	0,361	
30 (Б)	0,15	0,28	0,27	0,61	–0,38	–0,08	0,38	0,243	0,454	0,4374	0,378	0,6588	–0,410	0,248	–0,086	0,4104	0,324	0,323	
	0,11	0,16	0,27	1,09	–0,54	–0,1	0,31	0,178	0,259	0,4374	0,292	1,1772	–0,583	0,594	–0,108	0,3348	0,227	0,278	0,275

Продолжение приложения 4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	0,18	0,24	0,24	0,86	–0,49	–0,1	0,29	0,292	0,389	0,3888	0,356	0,9288	–0,529	0,399	–0,108	0,3132	0,205	0,225	
45 (В)	0,14	0,21	0,22	0,58	–0,31	–0,6	0,14	0,227	0,340	0,3564	0,308	0,6264	–0,335	0,292	–0,648	0,1512	–0,497	0,167	
	0,24	0,23	0,27	0,56	–0,35	–0,6	0,22	0,389	0,373	0,4374	0,399	0,6048	–0,378	0,227	–0,648	0,2376	–0,410	0,123	0,128
	0,19	0,21	0,21	0,54	–0,31	–0,64	0,19	0,308	0,340	0,3402	0,329	0,5832	–0,335	0,248	–0,691	0,2052	–0,486	0,095	
60 (Г)	0,17	0,2	0,2	1,35	–1,1	–0,58	0,26	0,275	0,324	0,324	0,308	1,458	–1,188	0,27	–0,626	0,2808	–0,346	0,08	
	0,16	0,23	0,18	1,4	–1,15	–0,55	0,21	0,259	0,373	0,2916	0,308	1,512	–1,242	0,27	–0,594	0,2268	–0,367	0,08	0,08
	0,15	0,25	0,17	1,41	–1,05	–0,57	0,19	0,243	0,405	0,2754	0,308	1,5228	–1,134	0,389	–0,616	0,2052	–0,410	0,079	
90 (Д)	0,04	0	0	0,41	–0,51	–0,9	0,86	0,065	0	0	0,022	0,4428	–0,551	–0,108	–0,972	0,9288	–0,043		
	0,01	0,03	0	0,52	–0,46	–0,86	0,73	0,016	0,049	0	0,022	0,5616	–0,497	0,065	–0,929	0,7884	–0,140		
	0	0,02	0,03	0,48	–0,54	–0,95	0,78	0	0,032	0,0486	0,027	0,5184	–0,583	–0,065	–1,026	0,8424	–0,185		

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Расчет максимальных значений коэффициентов обеспеченности воздухообменов $К_{об}$ для подземных пешеходных переходов I типа, расположенных в г. Нижний Новгород, при естественной вентиляции

Ориентация оси перехода	Направление ветра	Скорость ветра $v_{ветр}$, м/с	Повторяемость направлений ветра		Угол, α, град	Скорость воздуха в тоннеле, $v_т$, м/с	Расход воздуха в тоннеле, $L_т$, м^3/ч	Коэффициент обеспеченности, $K_{об}$, доли
			%	дни				
1	2	3	4	5	6	7	8	9
С−Ю (январь)	С	4	6	5	0	0,385	24 950	0,81
	СВ	3,4	6	5	45	0,33	21 380	
	В	4	8	6	90	0	0	
	ЮВ	3,9	12	10	45	0,355	23 000	
	Ю	4,2	18	14	0	0,4	25 920	
	ЮЗ	5,1	27	22	45	0,41	26570	
	З	4	14	11	90	0	0	
	СЗ	3,9	9	7	45	0,355	23 000	
С−Ю (июль)	С	4,1	13	10	0	0,4	25 920	0,68
	СВ	3,3	10	8	45	0,325	21 060	
	В	3,5	16	12	90	0	0	
	ЮВ	2,6	8	6	45	0,29	18 790	
	Ю	2,5	8	6	0	0,31	20090	
	ЮЗ	3,3	14	10	45	0,325	21 060	
	З	3,1	17	13	90	0	0	
	СЗ	4	14	10	45	0,36	23 330	

Продолжение приложения 5

1	2	3	4	5	6	7	8	9
З (январь)	С	4	6	5	90	0	0	0,8
	СВ	3,4	6	5	45	0,33	21 390	
	В	4	8	6	0	0,39	25 270	
	ЮВ	3,9	12	10	45	0,355	23 000	
	Ю	4,2	18	14	90	0	0	
	ЮЗ	5,1	27	22	45	0,41	26 570	
	З	4	14	11	0	0,39	25 270	
	СЗ	3,9	9	7	45	0,355	23 000	
З (июль)	С	4,1	13	10	90	0	0	0,76
	СВ	3,3	10	8	45	0,325	21 060	
	В	3,5	16	12	0	0,365	23 650	
	ЮВ	2,6	8	6	45	0,29	18 790	
	Ю	2,5	8	6	90	0	0	
	ЮЗ	3,3	14	10	45	0,325	21 060	
	З	3,1	17	13	0	0,34	22 030	
	СЗ	4	14	10	45	0,36	23 330	
СВ−ЮЗ (январь)	С	4	6	5	45	0,36	23 330	0,86
	СВ	3,4	6	5	0	0,355	23 000	
	В	4	8	6	45	0,36	23 330	
	ЮВ	3,9	12	10	90	0	0	
	Ю	4,2	18	14	45	0,37	23 980	
	ЮЗ	5,1	27	22	0	0,45	29 160	
	З	4	14	11	45	0,36	23330	
	СЗ	3,9	9	7	90	0	0	

Продолжение приложения 5

1	2	3	4	5	6	7	8	9
СВ–ЮЗ (июль)	С	4,1	13	10	45	0,365	23 650	0,78
	СВ	3,3	10	8	0	0,35	22 680	
	В	3,5	16	12	45	0,335	21 710	
	ЮВ	2,6	8	6	90	0	0	
	Ю	2,5	8	6	45	0,29	18 790	
	ЮЗ	3,3	14	10	0	0,35	22 680	
	З	3,1	17	13	45	0,315	20 410	
	СЗ	4	14	10	90	0	0	
СЗ–ЮВ (январь)	С	4	6	5	45	0,36	23 330	0,77
	СВ	3,4	6	5	90	0	0	
	В	4	8	6	45	0,36	23 330	
	ЮВ	3,9	12	10	0	0,385	24 950	
	Ю	4,2	18	14	45	0,37	23 980	
	ЮЗ	5,1	27	22	90	0	0	
	З	4	14	11	45	0,36	23 330	
	СЗ	3,9	9	7	0	0,385	24 950	
СЗ–ЮВ (июль)	С	4,1	13	10	45	0,365	23 650	0,74
	СВ	3,3	10	8	90	0	0	
	В	3,5	16	12	45	0,335	21 710	
	ЮВ	2,6	8	6	0	0,315	20 410	
	Ю	2,5	8	6	45	0,29	18 790	
	ЮЗ	3,3	14	10	90	0	0	
	З	3,1	17	13	45	0,315	20 410	
	СЗ	4	14	10	0	0,39	25 270	

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

Расчет максимальных значений коэффициентов обеспеченности воздухообменов $К_{об}$ для подземных пешеходных переходов I типа, расположенных в г. Тольятти, при естественной вентиляции

Ориентация оси перехода	Направление ветра	Скорость ветра $v_{ветр}$, м/с	Повторяемость направлений ветра		Угол, α, град	Скорость воздуха в тоннеле, $v_т$, м/с	Расход воздуха в тоннеле, $L_т$, м^3/ч	Коэффициент обеспеченности, $K_{об}$, доли
			%	дни				
1	2	3	4	5	6	7	8	9
С−Ю (январь)	С	4,9	10	8	0	0,44	28510	0,79
	СВ	4,4	6	5	45	0,38	24620	
	В	4,8	20	17	90	0	0	
	ЮВ	5,4	16	14	45	0,425	27540	
	Ю	5,7	12	10	0	0,485	31430	
	ЮЗ	4,7	16	14	45	0,39	25270	
	З	4,2	13	11	90	0	0	
	СЗ	3,7	7	6	45	0,345	22360	
С−Ю (июль)	С	3,8	18	15	0	0,38	24620	0,78
	СВ	4	13	11	45	0,36	23330	
	В	3,7	13	11	90	0	0	
	ЮВ	3,3	6	5	45	0,325	21060	
	Ю	4,3	4	3	0	0,405	26240	
	ЮЗ	3,6	10	9	45	0,34	22030	
	З	3,2	18	15	90	0	0	
	СЗ	3,5	18	15	45	0,335	21710	

Продолжение приложения 6

1	2	3	4	5	6	7	8	9
В–З (январь)	С	4,9	10	8	90	0	0	0,85
	СВ	4,4	6	5	45	0,38	24620	
	В	4,8	20	17	0	0,435	28190	
	ЮВ	5,4	16	14	45	0,425	27540	
	Ю	5,7	12	10	90	0	0	
	ЮЗ	4,7	16	14	45	0,39	25270	
	З	4,2	13	11	0	0,4	25920	
	СЗ	3,7	7	6	45	0,345	22360	
В–З (июль)	С	3,8	18	15	90	0	0	0,83
	СВ	4	13	11	45	0,36	23330	
	В	3,7	13	11	0	0,375	24300	
	ЮВ	3,3	6	5	45	0,325	21060	
	Ю	4,3	4	3	90	0	0	
	ЮЗ	3,6	10	9	45	0,34	22030	
	З	3,2	18	15	0	0,345	22360	
	СЗ	3,5	18	15	45	0,335	21710	
СВ–ЮЗ (январь)	С	4,9	10	8	45	0,4	25920	0,85
	СВ	4,4	6	5	0	0,41	26570	
	В	4,8	20	17	45	0,395	25600	
	ЮВ	5,4	16	14	90	0	0	
	Ю	5,7	12	10	45	0,44	28510	
	ЮЗ	4,7	16	14	0	0,43	27860	
	З	4,2	13	11	45	0,37	23980	
	СЗ	3,7	7	6	90	0	0	

Продолжение приложения 6

1	2	3	4	5	6	7	8	9
СВ–ЮЗ (июль)	С	3,8	18	15	45	0,35	22680	0,81
	СВ	4	13	11	0	0,39	25270	
	В	3,7	13	11	45	0,345	22360	
	ЮВ	3,3	6	5	90	0	0	
	Ю	4,3	4	3	45	0,375	24300	
	ЮЗ	3,6	10	9	0	0,37	23980	
	З	3,2	18	15	45	0,32	20740	
	СЗ	3,5	18	15	90	0	0	
СЗ–ЮВ (январь)	С	4,9	10	8	45	0,4	25920	0,89
	СВ	4,4	6	5	90	0	0	
	В	4,8	20	17	45	0,395	25600	
	ЮВ	5,4	16	14	0	0,47	30460	
	Ю	5,7	12	10	45	0,44	28510	
	ЮЗ	4,7	16	14	90	0	0	
	З	4,2	13	11	45	0,37	23980	
	СЗ	3,7	7	6	0	0,375	24300	
СЗ–ЮВ (июль)	С	3,8	18	15	45	0,35	22680	0,82
	СВ	4	13	11	90	0	0	
	В	3,7	13	11	45	0,345	22360	
	ЮВ	3,3	6	5	0	0,35	22680	
	Ю	4,3	4	3	45	0,375	24300	
	ЮЗ	3,6	10	9	90	0	0	
	З	3,2	18	15	45	0,32	20740	
	СЗ	3,5	18	15	0	0,365	23650	

ПРИЛОЖЕНИЕ 7

Темп самосогревания травы в скирде

Дата замера	$w_{тр}$, %	№ сечений (рис. 4.40)	$\Delta t/\Delta\tau$, °С/ч	$(\Delta t/\Delta\tau)_{ср}$, °С/ч
06.07.04 г. - 07.07.04 г.	35…55	1	0,6	1,13
		3	0,8	
		5	1,6	
		6	1,55	
		8	1,1	
		10	0,9	
		11	1,35	
09.07.04 г. – 10.07.04 г.	23…28	1	0,21	0,19
		3	0,14	
		5	0,2	
		6	0,31	
		8	0,12	
		10	0,08	
		11	0,19	
17.07.04 г. – 18.07.04 г.	18…20	1	0,0	0,06
		3	0,06	
		5	0,08	
		6	0,14	
		8	0,01	
		10	0,03	
		11	0,11	

ПРИЛОЖЕНИЕ 8

Результаты испытаний установки пассивного солнечного подогрева воздуха в САВ для сушки травы

Дата	Время (часы суток)	$t_н$, °С	$\varphi_н$, %	$t_в$, °С	$t_{во}$, °С	$\varphi_{во}$, %	$\Delta t = t_{во} - t_н$, °С	Примечания
1	2	3	4	5	6	7	8	9
2.07.04	9.00	18,3	79	18,6	22,3	65	4,0	Облачно
	10.00	19,1	76	19,6	23,3	60	4,2	- // -
	11.00	19,6	75	20,1	23,8	61	4,2	- // -
	13.00	18,8	90	19,4	23,7	68	4,9	- // -
	15.00	19,9	83	20,6	24,7	63	4,8	- // -
	16.00	20,8	76	21,4	24,8	61	4,0	перем.
	17.00	21,4	75	21,8	25,2	61	3,8	облач.(ветер)
	18.00	22,3	66	22,7	25,8	58	3,5	- // -
	20.00	24,8	39	25,1	28,6	35	3,8	слаб.облач
3.07.04	9.00	11,1	95	11,3	14,0	85	2,9	Пасмурно(ветер)
	10.00	10,7	95	10,9	13,6	85	2,9	- // -
	11.00	12,4	87	12,7	15,6	79	3,2	- // -
	13.00	15,0	74	15,5	19,4	60	4,4	- // -
	14.00	15,4	68	15,9	20,6	51	5,2	пререм.облач
	15.00	17,3	63	18,0	22,3	45	5,0	- // -
	16.00	17,8	57	18,2	22,6	42	4,8	- // -
	17.00	17,7	57	18,0	22,4	42	4,7	- // -
	19.00	22,3	66	22,5	26,3	53	4,0	- // -
	20.00	21,4	62	21,7	25,5	50	4,1	- // -
4.07.04	9.00	16,0	66	16,7	20,7	50	4,7	Ясно
	10.00	17,3	59	18,2	23,2	40	5,9	-// -
	11.00	18,0	50	19,2	25,3	31	7,3	- // -
	13.00	18,9	42	20,0	25,9	28	7,0	- // -
	14.00	19,9	40	19,9	26,7	28	6,8	- // -
	15.00	19,4	40	20,2	25,4	28	6,0	- // -
	16.00	19,4	41	20,2	25,0	28	5,6	- // -
	17.00	20,4	39	21,1	25,4	30	5,0	- // -
	19.00	17,1	64	17,5	21,2	50	4,1	- // -
	20.00	16,4	63	16,6	19,7	52	3,3	- // -
5.07.04	9.00	18,8	56	20,0	25,3	35	6,5	Ясно
	10.00	20,2	47	21,3	25,9	32	5,7	-// -
	11.00	20,0	45	21,5	27,5	31	7,5	- // -
	13.00	19,8	41	21,2	27,1	25	7,3	- // -
	14.00	20,4	40	21,5	27,4	25	7,0	- // -
	15.00	21,2	39	22,0	27,3	26	6,1	- // -
	16.00	20,7	40	21,4	26,3	27	5,6	- // -
	17.00	20,9	40	21,4	26,8	27	4,9	- // -

Продолжение приложения 8

1	2	3	4	5	6	7	8	9
5.07.04	18.00	20,4	42	20,8	24,4	31	4,0	- // -
	20.00	18,7	41	19,0	21,9	31	3,2	- // -
6.07.04	9.00	18,9	68	20,0	25,2	48	6,4	Ясно
	10.00	21,0	59	22,2	27,8	38	6,8	-// -
	11.00	22,4	55	23,6	29,4	36	7,0	- // -
	13.00	23,3	50	24,6	30,0	32	6,7	- // -
	14.00	24,0	47	25,3	30,2	30	6,2	- // -
	15.00	24,1	46	25,1	29,7	31	5,6	- // -
	16.00	24,2	45	24,9	29,2	32	5,0	- // -
	17.00	24,4	45	24,9	28,8	35	4,4	- // -
	18.00	23,7	45	24,0	27,8	35	4,1	- // -
	20.00	19,3	48	19,5	22,7	40	3,4	- // -
7.07.04	9.00	20,7	60	21,3	25,4	45	4,7	Перем.облач.
	10.00	21,3	56	22,2	26,8	39	5,5	-// -
	11.00	21,5	57	22,6	27,0	40	6,0	- // -
	13.00	21,6	57	22,4	27,5	40	5,9	- // -
	14.00	21,6	57	22,4	27,3	40	5,7	- // -
	15.00	23,5	51	24,0	29,0	37	5,5	- // -
	16.00	23,3	51	23,9	28,3	39	5,0	- // -
	17.00	22,0	58	22,4	26,0	45	4,0	- // -
	18.00	21,7	62	21,9	25,2	51	3,5	- // -
	20.00	21,6	53	21,6	24,5	45	2,9	- // -
8.07.04	9.00	15,3	95	15,7	19,8	76	4,5	Пасмурно
	10.00	15,5	95	15,8	19,7	76	4,2	-// -
	11.00	16,3	95	16,7	20,8	76	4,5	- // -
	13.00	16,8	91	17,2	21,2	72	4,4	- // -
	14.00	16,8	91	17,1	21,0	72	4,2	- // -
	15.00	17,8	92	18,0	21,2	78	3,4	- // -
	16.00	17,4	92	17,6	20,7	77	3,3	- // -
	17.00	17,7	82	17,7	20,6	70	2,9	- // -
	18.00	17,7	82	17,7	20,7	70	3,0	- // -
	20.00	18,9	84	18,9	20,9	80	2,0	- // -

ПРИЛОЖЕНИЕ 9

Результаты натурных экспериментальных исследований в хранилище картофеля

Номер точки	*t*, °С	φ, %	θ, °В	Номер точки	*t*, °С	φ, %	θ, °В	Номер точки	*t*, °С	φ, %	θ, °В	Номер точки	*t*, °С	φ, %	θ, °В	Номер точки	*t*, °С	φ, %	θ, °В	Номер точки	*t*, °С	φ, %	θ, °В
Ряд №1 Замер №1 (02.11.2013 г.)																							
1	4.1	83	16.2	4	4.9	86	18.1	7	5.1	92	21.5	10	5.3	83	17.2	13	4.7	85	17.5	16	3.9	89	18.8
2	3.8	85	16.9	5	4.7	87	18.4	8	5.2	86	18.4	11	5.1	83	17.0	14	4.8	87	18.5	17	4.1	85	17.1
3	3.6	77	13.8	6	4.3	87	18.1	9	4.7	85	17.5	12	4.8	85	17.6	15	4.1	76	13.7	18	3.6	83	15.9
Ряд №2 Замер №1 (02.11.2013 г.)																							
19	4.3	81	15.6	22	5.2	90	20.4	25	4.9	92	21.2	28	5.1	88	19.3	31	4.7	89	19.4	34	3.9	90	19.3
20	4.1	79	14.7	23	5.3	87	19.0	26	4.7	87	18.4	29	4.8	87	18.5	32	4.5	87	18.3	35	3.8	88	18.2
21	4.5	81	15.7	24	4.8	80	15.5	27	4.6	86	17.9	30	4.7	85	17.5	33	4.6	78	14.7	36	3.5	83	15.9
Ряд №1 Замер №2 (16.11.2013 г.)																							
1	4.2	85	17.1	4	4.9	92	21.2	7	5.1	92	21.5	10	5.1	93	22.1	13	5.2	87	18.9	16	4.1	88	18.4
2	3.9	83	16.1	5	4.6	89	19.3	8	5.2	90	20.4	11	5.1	90	20.3	14	5.1	86	18.3	17	3.7	82	15.6
3	3.7	79	14.5	6	4.6	87	18.3	9	4.8	86	18.0	12	4.8	88	19.0	15	4.7	85	17.5	18	3.9	77	13.9
Ряд №2 Замер №2 (16.11.2013 г.)																							
19	4.1	86	17.5	22	5.2	87	18.9	25	5.5	90	20.8	28	5.3	92	21.7	31	5.2	92	21.6	34	3.9	85	16.9
20	4.1	85	17.1	23	5.1	83	17.0	26	5.2	90	20.4	29	5.1	90	20.3	32	5.1	88	19.3	35	4.1	86	17.5
21	3.9	85	16.9	24	5	85	17.8	27	4.7	87	18.4	30	5.1	83	17.0	33	4.7	86	18.0	36	3.7	79	14.5
Ряд №1 Замер №3 (01.12.2013 г.)																							
1	3.9	85	16.9	4	4.9	90	20.1	7	5	90	20.2	10	5	91	20.8	13	5.1	91	20.9	16	4.2	82	15.9
2	3.7	81	15.2	5	4.7	88	18.9	8	4.8	91	20.6	11	4.8	90	20.0	14	4.9	90	20.1	17	3.8	84	16.4
3	3.8	82	15.6	6	4.6	83	16.6	9	4.7	85	17.5	12	4.7	86	18.0	15	4.9	86	18.1	18	3.6	79	14.4
Ряд №2 Замер №3 (01.12.2013 г.)																							
19	4	84	16.6	22	5	92	21.4	25	5.1	93	22.1	28	5.1	92	21.5	31	5.2	92	21.6	34	4	85	17.0
20	4.1	80	15.1	23	4.9	93	21.9	26	5	90	20.2	29	5.1	91	20.9	32	4.8	90	20.0	35	3.9	84	16.5
21	3.6	77	13.8	24	4.8	83	16.7	27	4.3	91	20.1	30	4.6	88	18.8	33	4.6	86	17.9	36	3.8	78	14.2

Продолжение приложения 9

Номер точки	*t*, °С	φ, %	θ, °В	Номер точки	*t*, °С	φ, %	θ, °В	Номер точки	*t*, °С	φ, %	θ, °В	Номер точки	*t*, °С	φ, %	θ, °В	Номер точки	*t*, °С	φ, %	θ, °В	Номер точки	*t*, °С	φ, %	θ, °В
Ряд №1 Замер №4 (14.12.2013 г.)																							
1	4.2	91	20.0	4	4.8	89	19.5	7	5	92	21.4	10	5.2	92	21.6	13	5.1	92	21.5	16	3.6	94	21.3
2	3.8	85	16.9	5	4.2	85	17.1	8	5	90	20.2	11	5.5	87	19.2	14	5.1	93	22.1	17	3.8	90	19.2
3	3.9	77	13.9	6	4.4	89	19.1	9	4.9	82	16.4	12	4.7	86	18.0	15	4.8	86	18.0	18	3.9	83	16.1
Ряд №2 Замер №4 (14.12.2013 г.)																							
19	4	82	15.8	22	5.1	95	23.4	25	5.2	91	21.0	28	5.3	92	21.7	31	5.2	92	21.6	34	3.9	89	18.8
20	3.9	83	16.1	23	5	93	22.0	26	4.9	89	19.6	29	5.1	91	20.9	32	4.9	92	21.2	35	3.6	86	17.2
21	3.9	78	14.2	24	4.6	90	19.8	27	4.6	88	18.8	30	5	90	20.2	33	4.7	89	19.4	36	3.5	83	15.9
Ряд №1 Замер №5 (11.01.2014 г.)																							
1	4.4	81	15.6	4	4.9	93	21.9	7	4.8	92	21.1	10	5.1	92	21.5	13	4.6	92	20.9	16	3.9	83	16.1
2	4.1	83	16.2	5	4.8	91	20.6	8	4.7	90	19.9	11	4.9	91	20.7	14	4.6	87	18.3	17	4.1	84	16.6
3	3.8	78	14.2	6	4.7	88	18.9	9	4.2	92	20.6	12	4.9	86	18.1	15	4.5	88	18.7	18	4.1	82	15.8
Ряд №2 Замер №5 (11.01.2014 г.)																							
19	3.9	88	18.3	22	5.1	89	19.8	25	5.2	90	20.4	28	5.1	92	21.5	31	5	91	20.8	34	3.8	89	18.7
20	3.9	86	17.4	23	5.1	87	18.8	26	4.8	88	19.0	29	5.2	92	21.6	32	4.8	91	20.6	35	3.6	87	17.6
21	3.6	79	14.4	24	5	86	18.2	27	4.6	85	17.4	30	4.6	86	17.9	33	4.6	89	19.3	36	3.5	81	15.1
Ряд №1 Замер №6 (25.01.2014 г.)																							
1	4.3	92	20.7	4	4.5	89	19.2	7	5	91	20.8	10	5.1	92	21.5	13	5.2	90	20.4	16	4.6	89	19.3
2	4.1	87	17.9	5	4.4	88	18.6	8	4.7	90	19.9	11	4.7	91	20.5	14	4.3	92	20.7	17	4.4	86	17.7
3	3.9	78	14.2	6	4.3	87	18.1	9	4.5	86	17.8	12	4.2	86	17.6	15	4.4	87	18.2	18	4	79	14.7
Ряд №2 Замер №6 (25.01.2014 г.)																							
19	4.1	90	19.4	22	4.6	92	20.9	25	5	92	21.4	28	5.3	92	21.7	31	5	93	22.0	34	4.4	91	20.2
20	3.8	87	17.7	23	4.7	91	20.5	26	4.8	91	20.6	29	4.8	90	20.0	32	4.9	91	20.7	35	4.2	77	14.1
21	3.8	77	13.9	24	4.3	89	19.1	27	4.5	88	18.7	30	4.6	89	19.3	33	4.6	90	19.8	36	4.3	78	14.5

ПРИЛОЖЕНИЕ 10

Поля температуры и относительной влажности по высоте хранилища

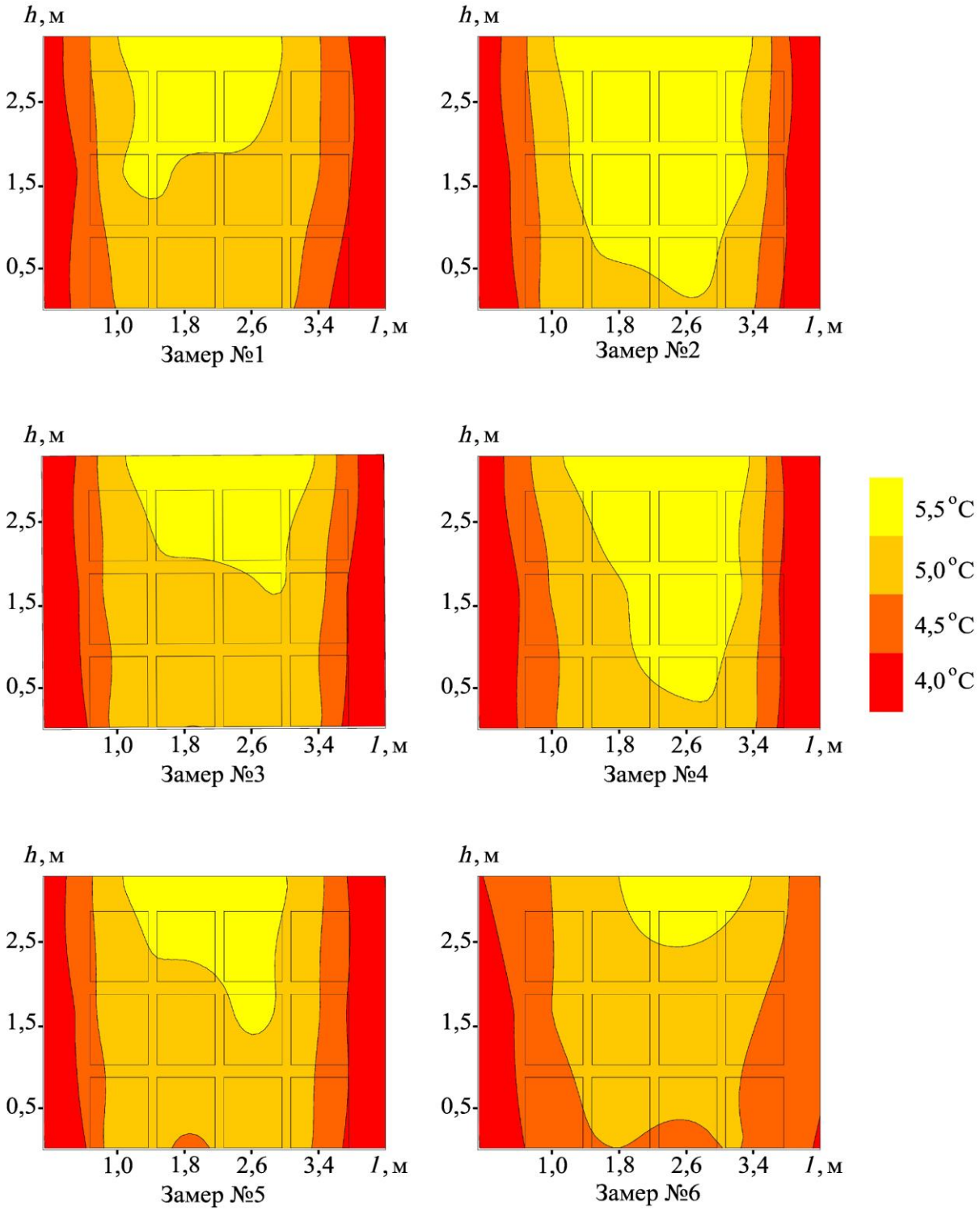


Рисунок П.10.1 – Поля температуры воздуха в хранилище

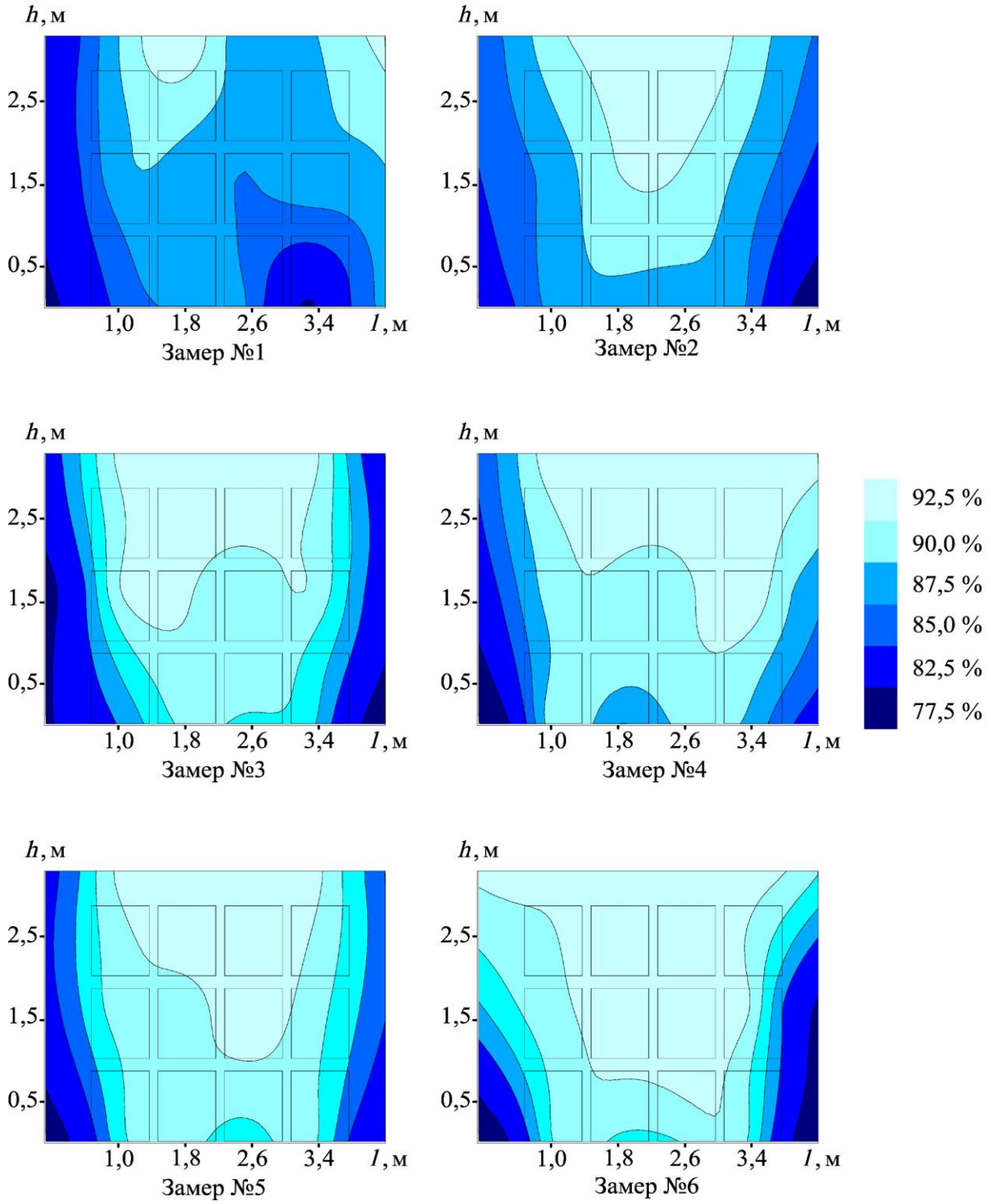


Рисунок П.10.2 – Поля относительной влажности воздуха в хранилище

ПРИЛОЖЕНИЕ 11

Результаты замеров температур наружного, внутреннего воздуха и внутренних поверхностей ограждающих конструкций здания коровника

Дата:	Параметры наружного и внутреннего воздуха	Температура внутренних поверхностей ограждений					
		стена		окно		покрытие	
		№ точек	$\tau^{НС}_{в.п}$, ºС	№ точек	$\tau^{О}_{в.п}$, ºС	№ точек	$\tau^{БП}_{в.п}$, ºС
1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*
15.10.2010	$t_н$ = 7 ºС; $t_с$ = 15,3 ºС; $t_м$ = 13,5 ºС; $\varphi_в$ = 81 %.	1	15,2	26	15,2	38	20,3
		2	16,5	27	15,2	39	20,4
		3	16,5	28	14,9	40	20,3
		4	16,0	29	15,1	41	20,2
		5	15,7	30	14,6	42	20,4
		6	16,3	31	15,0	43	20,1
		7	16,0	32	14,8	44	20,3
		8	16,2	33	15,1	45	20,4
		9	16,6	34	15,0	46	20,2
		10	16,3	35	14,9	47	20,3
		11	16,2	35	15,1	48	19,9
		12	15,9	37	14,8	49	19,8
		13	16,3			50	21,4
		14	16,5			51	21,4
		15	16,2			52	21,3
		16	17,2			53	21,2
		17	17,6			54	21,3
		18	17,4			55	21,0
		19	17,3			56	20,9
		20	17,0			57	20,9
		21	17,0			58	21,0
		22	17,4			59	20,8
		23	16,9			60	20,7
		24	17,0			61	20,6
		25	17,3				
23.10.2010	$t_н$ = 8 ºС; $t_с$ = 15,6 ºС; $t_м$ = 14,1 ºС; $\varphi_в$ = 84 %.	1	15,9	26	15,9	38	21,1
		2	16,6	27	15,7	39	21,2
		3	16,7	28	15,2	40	21,2
		4	16,7	29	15,6	41	21,0
		5	16,3	30	15,2	42	21,1
		6	17,0	31	15,7	43	20,8
		7	16,6	32	15,3	44	21,1
		8	16,7	33	15,6	45	21,1
		9	17,0	34	15,6	46	20,9
		10	16,8	35	15,4	47	20,9
		11	16,7	36	15,8	48	20,4
		12	16,4	37	15,7	49	20,6
		13	16,9			50	21,9
		14	17,0			51	21,7

Продолжение приложения 11

1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*
		15	16,7			52	21,6
		16	17,7			53	21,5
		17	17,9			54	21,6
		18	17,7			55	21,4
		19	17,6			56	21,2
		20	17,4			57	21,3
		21	17,6			58	21,3
		22	17,8			59	21,2
		23	17,3			60	21,1
		24	17,4			61	21,0
		25	17,8				
30.10.2010	$t_н$ = 2 ºС; $t_с$ = 13,1 ºС; $t_м$ = 11,6 ºС; $\varphi_в$ = 83 %.	1	12,1	26	11,4	38	16,9
		2	12,6	27	12,2	39	16,9
		3	12,7	28	12,2	40	17,0
		4	12,4	29	12,0	41	17,0
		5	12,4	30	12,0	42	17,2
		6	13,1	31	12,2	43	17,2
		7	13,0	32	11,9	44	17,0
		8	13,3	33	12,0	45	17,1
		9	13,7	34	12,1	46	17,2
		10	13,3	35	12,2	47	17,6
		11	13,7	36	12,0	48	17,2
		12	13,6	37	12,2	49	16,9
		13	14,0			50	18,6
		14	14,2			51	18,7
		15	13,8			52	18,6
		16	14,6			53	18,6
		17	15,4			54	18,6
		18	15,2			55	18,2
		19	15,2			56	18,5
		20	15,0			57	18,4
		21	15,0			58	18,3
		22	15,3			59	18,3
		23	15,0			60	18,0
		24	15,3			61	17,9
		25	15,1				
02.11.2010	$t_н$ = 3 ºС; $t_с$ = 13,5 ºС; $t_м$ = 12,6 ºС; $\varphi_в$ = 90 %.	1	12,4	26	12,6	38	16,8
		2	13,8	27	13,0	39	16,9
		3	13,6	28	13,3	40	16,8
		4	13,6	29	12,9	41	16,9
		5	13,5	30	12,9	42	17,3
		6	13,7	31	12,4	43	17,2
		7	14,0	32	12,6	44	17,0
		8	14,4	33	12,7	45	17,1
		9	15,2	34	12,4	46	17,1
		10	14,7	35	12,4	47	17,8
		11	14,4	36	12,9	48	17,4
		12	14,3	37	13,0	49	16,3

Продолжение приложения 11

1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*
		13	14,5			50	19,6
		14	14,7			51	19,9
		15	14,4			52	20,0
		16	15,4			53	19,7
		17	16,8			54	19,6
		18	16,2			55	18,9
		19	16,5			56	19,2
		20	16,0			57	19,2
		21	15,2			58	19,3
		22	15,8			59	19,1
		23	15,5			60	18,6
		24	15,6			61	18,5
		25	15,5				
09.11.2010	$t_н$ = 6 ºС; $t_с$ = 14,9 ºС; $t_м$ = 13,8 ºС; $\varphi_в$ = 88 %.	1	14,5	26	14,6	38	19,4
		2	15,5	27	14,7	39	19,5
		3	15,5	28	14,5	40	19,4
		4	15,5	29	14,6	41	19,4
		5	15,2	30	14,3	42	19,6
		6	15,7	31	14,4	43	19,4
		7	15,6	32	14,5	44	19,5
		8	15,8	33	14,8	45	19,5
		9	16,3	34	14,1	46	19,4
		10	16,0	35	14,6	47	19,7
		11	15,8	36	14,6	48	19,2
		12	15,6	37	14,7	49	18,9
		13	15,9			50	21,0
		14	16,1			51	21,0
		15	15,8			52	21,0
		16	16,8			53	20,8
		17	17,5			54	20,8
		18	17,1			55	20,4
		19	17,2			56	20,4
		20	16,8			57	20,5
		21	16,6			58	20,5
		22	17,0			59	20,4
		23	16,6			60	20,1
		24	16,7			61	20,0
		25	16,9				
17.11.2010	$t_н$ = 9 ºС; $t_с$ = 15,8 ºС; $t_м$ = 14,4 ºС; $\varphi_в$ = 85 %.	1	16,3	26	16,2	38	21,2
		2	16,4	27	16,3	39	21,0
		3	16,6	28	16,1	40	21,0
		4	16,8	29	15,8	41	21,3
		5	16,7	30	15,6	42	21,0
		6	17,1	31	15,7	43	21,4
		7	17,4	32	15,8	44	21,5
		8	17,3	33	15,8	45	21,4
		9	17,3	34	16,0	46	21,4
		10	17,2	35	16,1	47	21,3

Продолжение приложения 11

1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*
		11	16,8	36	15,9	48	21,5
		12	17,4	37	16,2	49	21,6
		13	17,5			50	21,8
		14	17,2			51	21,4
		15	17,2			52	21,7
		16	17,6			53	21,5
		17	17,7			54	21,6
		18	17,6			55	21,5
		19	17,8			56	21,5
		20	17,8			57	21,4
		21	18,0			58	21,2
		22	18,2			59	21,2
		23	18,3			60	21,0
		24	18,0			61	21,1
		25	18,2				
09.12.2010	$t_н$ = 0 ºС; $t_с$ = 12,1 ºС; $t_м$ = 11,2 ºС; $\varphi_в$ = 89 %.	1	10,3	26	10,4	38	15,9
		2	9,6	27	11,3	39	15,3
		3	10,4	28	10,5	40	16,0
		4	9,5	29	10,4	41	15,7
		5	9,9	30	11,3	42	15,8
		6	11,5	31	11,4	43	16,3
		7	10,8	32	11,3	44	15,6
		8	11,4	33	10,7	45	15,6
		9	10,7	34	10,8	46	16,3
		10	10,4	35	10,6	47	17,1
		11	13,6	36	10,4	48	16,3
		12	13,5	37	11,0	49	16,8
		13	13,7			50	17,5
		14	13,8			51	17,3
		15	13,0			52	17,1
		16	12,7			53	17,9
		17	14,9			54	17,7
		18	14,9			55	17,4
		19	14,6			56	19,1
		20	14,8			57	17,9
		21	16,8			58	17,0
		22	15,4			59	17,3
		23	14,5			60	16,9
		24	15,6			61	16,6
		25	15,1				
16.12.2010	$t_н$ = –4 ºС; $t_с$ = 10,0 ºС; $t_м$ = 9,8 ºС; $\varphi_в$ = 97 %.	1	7,6	26	6,7	38	13,0
		2	7,4	27	7,4	39	13,1
		3	7,6	28	7,7	40	13,4
		4	6,8	29	7,3	41	13,6
		5	7,2	30	7,2	42	13,7
		6	8,0	31	8,1	43	13,8
		7	7,9	32	6,8	44	13,5
		8	8,3	33	7,0	45	13,7

Продолжение приложения 11

1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*
		9	8,5	34	7,1	46	13,8
		10	8,2	35	6,9	47	14,2
		11	9,0	36	7,3	48	14,0
		12	9,0	37	7,5	49	13,9
		13	9,6			50	14,0
		14	9,9			51	14,2
		15	9,5			52	14,2
		16	10,2			53	14,3
		17	10,2			54	14,2
		18	10,4			55	14,2
		19	10,3			56	14,3
		20	10,4			57	14,6
		21	10,7			58	14,3
		22	11,3			59	14,6
		23	11,2			60	14,4
		24	11,7			61	14,4
		25	10,8				
22.12.2010	$t_н$ = –3 ºС; $t_с$ = 10,7 ºС; $t_м$ = 9,9 ºС; $\varphi_в$ = 90 %.	1	9,0	26	7,1	38	13,8
		2	8,6	27	7,9	39	13,7
		3	9,0	28	9,0	40	14,1
		4	8,2	29	8,7	41	14,2
		5	8,6	30	8,8	42	14,3
		6	9,6	31	9,0	43	14,5
		7	9,3	32	8,7	44	14,1
		8	9,8	33	8,8	45	14,2
		9	9,7	34	8,9	46	14,5
		10	9,4	35	9,0	47	15,0
		11	10,9	36	9,3	48	14,6
		12	10,9	37	9,8	49	14,7
		13	11,3			50	15,0
		14	11,6			51	15,1
		15	11,1			52	15,0
		16	11,5			53	15,3
		17	12,1			54	15,2
		18	12,3			55	15,1
		19	12,1			56	15,6
		20	12,2			57	15,5
		21	13,0			58	15,0
		22	13,0			59	15,3
		23	12,7			60	15,1
		24	13,4			61	15,0
		25	12,6				
24.12.2010	$t_н$ = –7 ºС; $t_с$ = 9,8 ºС; $t_м$ = 9,6 ºС; $\varphi_в$ = 97 %.	1	6,1	26	3,8	38	11,9
		2	6,3	27	4,0	39	11,8
		3	6,2	28	4,3	40	11,8
		4	6,2	29	4,3	41	11,6
		5	6,0	30	4,4	42	12,0
		6	6,2	31	4,5	43	11,8

Продолжение приложения 11

1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*
		7	6,3	32	3,9	44	11,9
		8	6,3	33	4,2	45	11,7
		9	6,4	34	4,2	46	11,6
		10	6,5	35	4,1	47	11,6
		11	6,9	36	4,3	48	11,8
		12	7,0	37	4,4	49	11,9
		13	7,3			50	12,1
		14	7,2			51	12,2
		15	7,1			52	12,2
		16	7,3			53	12,1
		17	7,6			54	12,3
		18	7,6			55	12,4
		19	7,5			56	12,2
		20	7,7			57	12,2
		21	7,6			58	12,2
		22	7,6			59	12,1
		23	7,8			60	12,4
		24	8,0			61	12,5
		25	7,6				
12.01.2011	$t_н$ = –6 ºС; $t_с$ = 10,0 ºС; $t_м$ = 9,5 ºС; $\varphi_в$ = 93 %.	1	6,1	26	4,4	38	11,5
		2	6,1	27	4,6	39	12,0
		3	6,0	28	4,5	40	12,1
		4	5,3	29	4,7	41	12,6
		5	5,7	30	4,9	42	12,7
		6	6,1	31	5,4	43	12,6
		7	6,2	32	4,8	44	12,5
		8	6,6	33	5,0	45	12,7
		9	7,2	34	4,7	46	12,6
		10	6,9	35	4,0	47	12,8
		11	6,5	36	4,3	48	12,8
		12	6,6	37	5,1	49	12,5
		13	7,3			50	12,3
		14	7,8			51	12,7
		15	7,6			52	12,7
		16	8,8			53	12,5
		17	7,6			54	12,5
		18	8,0			55	12,6
		19	8,0			56	11,9
		20	8,0			57	12,9
		21	7,5			58	12,9
		22	9,0			59	13,2
		23	9,3			60	13,2
		24	9,6			61	13,3
		25	8,5				
19.01.2011	$t_н$= –14 ºС; $t_с$ = 8,4 ºС; $t_м$ = 7,7 ºС; $\varphi_в$ = 90 %.	1	2,7	26	0,5	38	7,7
		2	3,0	27	1,0	39	7,7
		3	2,4	28	2,1	40	7,7
		4	2,1	29	2,0	41	8,0

Продолжение приложения 11

1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*
		5	2,0	30	2,3	42	8,0
		6	2,8	31	2,5	43	7,9
		7	2,4	32	1,5	44	8,1
		8	3,0	33	1,8	45	8,4
		9	3,5	34	2,4	46	8,4
		10	3,0	35	1,4	47	8,3
		11	3,5	36	1,5	48	8,4
		12	3,5	37	3,0	49	8,3
		13	5,0			50	8,2
		14	4,9			51	8,5
		15	4,2			52	8,5
		16	6,7			53	8,6
		17	7,1			54	8,6
		18	7,2			55	8,6
		19	7,2			56	9,0
		20	6,0			57	9,1
		21	8,0			58	9,1
		22	7,8			59	9,1
		23	7,7			60	9,0
		24	7,1			61	8,7
		25	6,6				
22.01.2011	$t_н$ = –23 ºС; $t_с$ = 5,0 ºС; $t_м$ = 4,6 ºС; $\varphi_в$ = 94 %.	1	–3,0	26	–5,0	38	5,1
		2	–3,2	27	–3,1	39	5,0
		3	–3,5	28	–2,6	40	4,9
		4	–4,0	29	–2,5	41	5,5
		5	–4,1	30	–1,9	42	5,2
		6	–3,7	31	–1,6	43	5,1
		7	–3,3	32	–2,0	44	5,2
		8	–3,0	33	–1,8	45	5,2
		9	–2,0	34	–1,9	46	5,3
		10	–2,2	35	–2,2	47	5,2
		11	–1,0	36	–2,0	48	5,0
		12	0,8	37	0,0	49	4,9
		13	1,0			50	5,1
		14	2,4			51	5,2
		15	2,0			52	5,0
		16	4,5			53	5,1
		17	4,8			54	5,0
		18	4,7			55	5,1
		19	4,6			56	5,3
		20	3,2			57	5,8
		21	6,1			58	5,7
		22	6,0			59	5,8
		23	5,6			60	5,7
		24	5,6			61	5,5
		25	5,0				
03.02.2011	$t_н$ = –12 ºС; $t_с$ = 8,6 ºС;	1	3,5	26	1,7	38	8,6
		2	3,8	27	2,5	39	8,7

Продолжение приложения 11

1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*
	$t_м$ = 8,5 ºС; $\varphi_в$ = 99 %.	3	3,3	28	3,1	40	8,8
		4	2,9	29	2,3	41	9,1
		5	2,9	30	2,0	42	9,1
		6	3,6	31	2,5	43	9,0
		7	3,3	32	2,2	44	9,2
		8	3,9	33	3,0	45	9,4
		9	4,4	34	2,6	46	9,4
		10	4,0	35	2,8	47	9,4
		11	4,2	36	2,9	48	9,5
		12	4,3	37	2,8	49	9,3
		13	5,6			50	9,2
		14	5,6			51	9,5
		15	5,0			52	9,5
		16	7,2			53	9,6
		17	7,2			54	9,6
		18	7,4			55	9,6
		19	7,4			56	9,7
		20	6,5			57	10,0
		21	7,9			58	10,0
		22	8,1			59	10,1
		23	8,1			60	10,0
		24	7,7			61	9,8
		25	7,1				
08.02.2011	$t_н$ = –8 ºС; $t_с$ = 9,4 ºС; $t_м$ = 8,7 ºС; $\varphi_в$ = 91 %.	1	5,2	26	3,4	38	10,5
		2	5,3	27	3,9	39	10,8
		3	5,0	28	4,6	40	10,9
		4	4,4	29	3,9	41	11,4
		5	4,7	30	3,5	42	11,4
		6	5,2	31	4,2	43	11,3
		7	5,2	32	3,8	44	11,3
		8	5,6	33	4,2	45	11,5
		9	6,2	34	4,1	46	11,5
		10	5,9	35	4,0	47	11,6
		11	5,7	36	3,9	48	11,6
		12	5,8	37	3,9	49	11,4
		13	6,7			50	11,2
		14	7,0			51	11,6
		15	6,7			52	11,6
		16	8,2			53	11,5
		17	7,5			54	11,5
		18	7,8			55	11,5
		19	7,8			56	11,1
		20	7,5			57	11,9
		21	7,6			58	11,9
		22	8,7			59	12,1
		23	8,9			60	12,1
		24	8,9			61	12,1
		25	8,0				

Продолжение приложения 11

1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*
14.02.2011	$t_н$ = –10 ºС; $t_с$ = 9,0 ºС; $t_м$ = 8,8 ºС; $\varphi_в$ = 97 %.	1	4,4	26	2,4	38	9,6
		2	4,5	27	3,3	39	9,8
		3	4,2	28	3,7	40	9,8
		4	3,7	29	3,1	41	10,2
		5	3,8	30	2,7	42	10,3
		6	4,4	31	3,8	43	10,2
		7	4,3	32	3,3	44	10,2
		8	4,8	33	3,4	45	10,5
		9	5,3	34	3,5	46	10,4
		10	4,9	35	3,3	47	10,5
		11	5,0	36	3,1	48	10,5
		12	5,0	37	3,3	49	10,3
		13	6,1			50	10,2
		14	6,3			51	10,5
		15	5,9			52	10,5
		16	7,7			53	10,5
		17	7,3			54	10,5
		18	7,6			55	10,6
		19	7,6			56	10,4
		20	7,0			57	11,0
		21	7,8			58	11,0
		22	8,4			59	11,1
		23	8,5			60	11,0
		24	8,3			61	10,9
		25	7,5				
24.02.2011	$t_н$ = –18 ºС; $t_с$ = 8,0 ºС; $t_м$ = 7,3 ºС; $\varphi_в$ = 90 %.	1	0,2	26	–1,9	38	6,5
		2	0,2	27	0,0	39	6,5
		3	–0,2	28	0,7	40	6,5
		4	–0,6	29	–0,1	41	6,9
		5	–0,7	30	–0,2	42	6,8
		6	–0,1	31	1,5	43	6,7
		7	–0,1	32	–1,5	44	6,8
		8	0,3	33	0,1	45	7,0
		9	1,1	34	0,4	46	7,0
		10	0,7	35	0,0	47	6,9
		11	1,5	36	–0,1	48	6,9
		12	2,3		1,3	49	6,8
		13	3,2			50	6,8
		14	3,8			51	7,0
		15	3,2			52	6,9
		16	5,7			53	7,0
		17	6,1			54	7,0
		18	6,1			55	7,0
		19	6,0			56	7,4
		20	4,8			57	7,6
		21	7,2			58	7,6
		22	7,0			59	7,6
		23	6,8			60	7,5

Продолжение приложения 11

1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*
		24	6,4			61	7,3
		25	5,9				
05.03.2011	$t_н$ = –5 ºС; $t_с$ = 10,0 ºС; $t_м$ = 9,1 ºС; $\varphi_в$ = 88 %.	1	7,0	26	5,1	38	12,9
		2	6,9	27	5,2	39	12,8
		3	7,0	28	5,2	40	12,9
		4	6,6	29	5,7	41	13,0
		5	6,5	30	5,4	42	12,7
		6	6,6	31	5,8	43	12,6
		7	7,0	32	5,3	44	12,6
		8	6,8	33	5,0	45	12,9
		9	7,6	34	5,4	46	12,9
		10	7,4	35	5,7	47	13,0
		11	7,4	36	5,5	48	13,1
		12	8,0	37	6,0	49	12,8
		13	8,3			50	13,2
		14	8,7			51	13,3
		15	8,7			52	13,6
		16	9,4			53	13,7
		17	9,1			54	13,0
		18	8,5			55	13,3
		19	8,9			56	13,3
		20	8,9			57	13,6
		21	8,7			58	13,7
		22	9,1			59	13,6
		23	9,7			60	13,6
		24	9,8			61	13,2
		25	9,8				
11.03.2011	$t_н$ = –2 ºС; $t_с$ = 11,5 ºС; $t_м$ = 10,6 ºС; $\varphi_в$ = 89 %.	1	9,5	26	9,4	38	14,6
		2	9,3	27	9,8	39	14,3
		3	9,4	28	10,1	40	14,5
		4	9,4	29	10,3	41	14,5
		5	8,8	30	10,2	42	15,1
		6	10,1	31	10,4	43	15,0
		7	9,9	32	9,7	44	15,0
		8	9,8	33	10,0	45	15,3
		9	10,2	34	10,4	46	15,4
		10	10,3	35	10,5	47	15,8
		11	10,8	36	10,3	48	15,6
		12	11,3	37	10,6	49	15,7
		13	11,6			50	16,4
		14	11,7			51	16,2
		15	11,8			52	16,0
		16	12,0			53	15,9
		17	12,5			54	16,3
		18	12,8			55	16,3
		19	12,9			56	16,6
		20	13,0			57	16,5
		21	13,1			58	16,4

Продолжение приложения 11

1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*
		22	13,5			59	16,3
		23	13,6			60	16,5
		24	14,1			61	16,6
		25	14,2				
16.03.2011	$t_н$ = 1 ºС; $t_с$ = 12,6 ºС; $t_м$ = 11,8 ºС; $\varphi_в$ = 90 %.	1	11,8	26	10,5	38	16,3
		2	12,1	27	11,6	39	16,3
		3	12,3	28	11,6	40	16,4
		4	11,9	29	11,4	41	16,5
		5	12,0	30	11,4	42	16,7
		6	12,7	31	11,8	43	16,7
		7	12,5	32	11,5	44	16,5
		8	12,9	33	11,4	45	16,6
		9	13,2	34	11,4	46	16,7
		10	12,8	35	10,9	47	17,1
		11	13,5	36	11,6	48	16,7
		12	13,4	37	11,3	49	16,5
		13	13,7			50	17,9
		14	14,0			51	18,0
		15	13,6			52	17,9
		16	14,3			53	18,0
		17	15,0			54	17,9
		18	14,9			55	17,6
		19	14,9			56	17,9
		20	14,7			57	17,9
		21	14,9			58	17,7
		22	15,2			59	17,7
		23	14,8			60	17,5
		24	15,2			61	17,4
		25	14,9				
21.03.2011	$t_н$ = –1 ºС; $t_с$ = 11,7 ºС; $t_м$ = 10,8 ºС; $\varphi_в$ = 89 %.	1	10,1	26	9,7	38	15,1
		2	10,2	27	9,9	39	15,3
		3	10,5	28	10,4	40	15,3
		4	10,6	29	10,9	41	15,4
		5	10,6	30	10,6	42	15,2
		6	11,0	31	10,5	43	15,6
		7	11,1	32	10,1	44	15,5
		8	10,9	33	10,3	45	15,7
		9	11,5	34	10,2	46	15,7
		10	11,4	35	9,9	47	16,2
		11	11,6	36	10,4	48	16,2
		12	12,0	37	10,5	49	15,7
		13	12,2			50	16,0
		14	12,1			51	16,2
		15	12,6			52	16,5
		16	12,7			53	16,7
		17	13,0			54	16,7
		18	13,2			55	16,6
		19	13,3			56	17,2

Продолжение приложения 11

1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*
		20	13,3			57	17,1
		21	13,1			58	17,1
		22	13,5			59	17,0
		23	13,4			60	16,8
		24	13,7			61	16,7
		25	13,7				
31.03.2011	$t_н$ = 4 ºС; $t_с$ = 14,2 ºС; $t_м$ = 13,4 ºС; $\varphi_в$ = 91 %.	1	13,7	26	13,4	38	18,5
		2	13,9	27	13,6	39	18,5
		3	14,0	28	13,7	40	18,6
		4	14,4	29	13,4	41	18,9
		5	14,3	30	13,5	42	18,7
		6	14,2	31	13,3	43	18,6
		7	14,5	32	13,0	44	18,7
		8	14,9	33	13,3	45	18,8
		9	15,0	34	13,3	46	18,6
		10	14,9	35	13,6	47	18,8
		11	15,3	36	13,8	48	18,7
		12	15,3	37	13,9	49	18,6
		13	15,4			50	19,2
		14	15,2			51	19,5
		15	15,1			52	19,5
		16	15,7			53	19,6
		17	15,8			54	20,0
		18	15,7			55	20,1
		19	15,8			56	19,8
		20	15,8			57	19,8
		21	16,1			58	19,9
		22	16,2			59	20,0
		23	16,1			60	20,1
		24	16,1			61	19,8
		25	16,4				
09.04.2011	$t_н$ = 5 ºС; $t_с$ = 14,5 ºС; $t_м$ = 13,3 ºС; $\varphi_в$ = 87 %.	1	13,9	26	14,1	38	18,7
		2	15,0	27	14,3	39	18,8
		3	14,9	28	14,3	40	18,7
		4	14,9	29	14,2	41	18,7
		5	14,7	30	14,0	42	19,0
		6	15,1	31	13,9	43	18,8
		7	15,1	32	13,7	44	18,8
		8	15,4	33	14,0	45	18,9
		9	16,0	34	14,1	46	18,8
		10	15,6	35	13,9	47	19,2
		11	15,4	36	14,2	48	18,8
		12	15,2	37	14,4	49	18,2
		13	15,5			50	20,7
		14	15,7			51	20,8
		15	15,4			52	20,8
		16	16,4			53	20,6
		17	17,3			54	20,6

Продолжение приложения 11

1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*
		18	16,9			55	20,1
		19	17,0			56	20,2
		20	16,6			57	20,2
		21	16,2			58	20,3
		22	16,7			59	20,1
		23	16,3			60	19,8
		24	16,4			61	19,7
		25	16,5				
22.04.2011	$t_н$ = 10 ºС; $t_с$ = 16,1 ºС; $t_м$ = 14,5 ºС; $\varphi_в$ = 83 %.	1	17,8	26	16,8	38	22,9
		2	17,8	27	16,7	39	23,1
		3	17,7	28	16,5	40	23,3
		4	17,6	29	16,3	41	22,9
		5	17,9	30	16,4	42	22,9
		6	17,8	31	17,0	43	23,1
		7	17,6	32	16,4	44	22,8
		8	17,9	33	16,5	45	22,8
		9	17,9	34	16,3	46	22,9
		10	17,9	35	15,9	47	22,7
		11	17,8	36	16,2	48	22,5
		12	18,0	37	16,5	49	22,6
		13	17,9			50	22,8
		14	17,7			51	22,5
		15	17,7			52	22,3
		16	18,0			53	22,1
		17	18,1			54	22,1
		18	18,1			55	22,2
		19	17,9			56	22,2
		20	18,0			57	22,0
		21	18,0			58	21,8
		22	17,8			59	22,3
		23	18,2			60	22,1
		24	18,3			61	22,0
		25	18,3				

ПРИЛОЖЕНИЕ 12

Конструктивные характеристики теплового контура коровника

Коровник на z = 200 голов коров с беспривязным содержанием в Самарской области. Масса одной коровы 500 кг, уровень лактации 10 л, удельные явные тепловыделения $q_ж$ = 723 Вт/гол, влаговыделения $j_ж$ = 455 г/ч. Помещение наземное, неотапливаемое, одноэтажное, размером 78,0 х 21,0 м, высота наружных стен 2,0 м, высота в коньке 4,15 м. В продольных стенах имеется по 12 окон размером 1,8 х 0,6 м. В торцах помещения предусмотрены транспортные ворота. Ориентация продольной оси здания «СВ–ЮЗ».

Вентиляция помещения коровника естественная, осуществляемая в теплый период года за счет активной аэрации через фрамуги окон, ворота; в холодный период года – через светоаэрационный фонарь, предусмотренный по всей длине конька здания.

Наружные стены:

а) до реконструкции: железобетонная плита: $\rho_{ж/б}$ = 2500 кг/м^3, $\lambda_{ж/б,(Б*)}$ = 2,24 Вт/(м·ºС), $\mu_{ж/б}$ = 0,03 мг/(м·ч·Па), $\delta_{ж/б}$ = 0,4 м.

б) после реконструкции

Вариант 1: 1 – железобетонная плита: $\rho_{ж/б}$ = 2500 кг/м^3, $\lambda_{ж/б,(Б*)}$ = 2,24 Вт/(м·ºС), $\mu_{ж/б}$ = 0,03 мг/(м·ч·Па); 2 – керамзитобетонные панели: $\rho_{ут}$ = 800 кг/м^3, $\lambda_{ут,(Б*)}$ = 0,34 Вт/(м·ºС), $\mu_{ут}$ = 0,19 мг/(м·ч·Па); 3 – цементно-песчаная штукатурка: $\rho_{шт}$ = 1800 кг/м^3, $\lambda_{шт,(Б*)}$ = 1,02 Вт/(м·ºС), $\mu_{шт}$ = 0,09 мг/(м·ч·Па).

Вариант 2: деревянный брус: $\rho_д$ = 500 кг/м^3, $\lambda_д$ = 0,35 Вт/(м·ºС), $\mu_{ж/б}$ = 0,32 мг/(м·ч·Па).

Перекрытие бесчердачное двускатное, уклон кровли 0,18:

а) до реконструкции: 1 – железобетонная плита: $\delta_{ж/б}$ = 0,03 м, $\rho_{ж/б}$ = 2500 кг/м^3, $\lambda_{ж/б,(Б*)}$ = 2,24 Вт/(м·ºС), $\mu_{ж/б}$ = 0,03 мг/(м·ч·Па); 2 – вентилируемая воздушная прослойка; 3 – листовая сталь: $\rho_{ст}$ = 7850 кг/м^3, $\lambda_{ст}$ = 58 Вт/(м·ºС), $\mu_{ст}$ = 0 мг/(м·ч·Па);

б) после реконструкции

Вариант 1: 1 – железобетонная плита: $\rho_{ж/б}$ = 2500 кг/м^3, $\lambda_{ж/б,(Б*)}$ = 2,24 Вт/(м·ºС), $\mu_{ж/б}$ = 0,03 мг/(м·ч·Па); 2 – минераловатная плита на битумном связующем: $\rho_{ут}$ = 250 кг/м^{3,} $\lambda_{ут,(Б*)}$ = 0,09 Вт/(м·ºС), $\mu_{ут}$ = 0,41 мг/(м·ч·Па); 3 – вентилируемая воздушная прослойка; 4 – листовая сталь: $\rho_{ст}$ = 7850 кг/м^3, $\lambda_{ст}$ = 58 Вт/(м·ºС), $\mu_{ст}$ = 0 мг/(м·ч·Па).

Вариант 2: доски $\delta_д$ = 0,05 м, $\rho_д$ = 500 кг/м^3, $\lambda_д$ = 0,35 Вт/(м·ºС), $\mu_д$ = 0,32 мг/(м·ч·Па); минераловатные плиты на битумной основе: $\rho_{ут}$ = 250 кг/м^3, $\lambda_{ут,(Б*)}$ = 0,09 Вт/(м·°С), $\mu_{ут}$ = 0,41·10^{-6} кг/(м·ч·Па); вентилируемая воздушная прослойка; 2

слоя рубероида: $\delta_р$ = 0,008 м, $\rho_д$ = 600 кг/м^3, $\lambda_д$ = 0,17 Вт/(м·ºС), $\mu_{ж/б}$ = 0 мг/(м·ч·Па); листовая сталь: $\delta_{ст}$ = 0,0009 м; $\rho_{ст}$ = =7850 кг/м^3, $\lambda_{ст}$ = 58 Вт/(м·ºС), $\mu_{ст}$ = 0 мг/(м·ч·Па) по обрешетке из деревянного бруса размером 80х80 мм.

Водоизоляционная кровля выполнена из листовой стали: $\delta_{ст}$ = 0,0009 м, $\rho_{ст}$ = 7850 кг/м^3, $\lambda_{ст}$ = 58 Вт/(м·ºС), $\mu_{ст}$ = 0 мг/(м·ч·Па) по обрешетке из досок размером 100 х 30 мм.

Остекление двойное в спаренных деревянных переплетах. Ворота металлические, распашные, неутепленные. Полы бетонные.

Климатические характеристики района строительства. Район строительства – Ставропольский район Самарской области.

Параметры наружного воздуха: средняя температура наиболее холодной пятидневки ($k_{об}$ = 0,92) $t_н$ = –30 °С; средняя относительная влажность воздуха наиболее холодного месяца (января) $\varphi_н$ = 84 %. Зона влажности района строительства – сухая.

Параметры внутреннего воздуха: расчетная температура в помещении $t_в$ = 10 °С; относительная влажность воздуха в рабочей зоне помещения $\varphi_в$ = 60 %.

ПРИЛОЖЕНИЕ 13

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель ректора по развитию
учебного процесса
Тольяттинского государственного
университета
_____А.Н. Ярыгин
“ ” _____2016 г.

АКТ о внедрении
результатов научно-исследовательской (опытно-конструкторской) работы

Комиссия в составе:

Председатель _заместитель ректора-директор института, к.п.н., Н.И. Устенков,

члены комиссии: __зам. директора по учебной работе Е.Б. Гришина,

зам.директора по научно-исследовательской работе Р.В. Охлопков,

составила настоящий акт о том, что результаты, полученные к.т.н., доцентом, зав.кафедрой «Теплогазоснабжение, вентиляция, водоснабжение и водоотведение» **Кучеренко Марией Николаевной** по ведущейся научно-исследовательской теме: «Совершенствование аэродинамических и теплофизических показателей энергоэффективных систем обеспечения параметров микроклимата» *использованы в учебном процессе кафедры «Теплогазоснабжение, вентиляция, водоснабжение и водоотведение».* За основу приняты изданные (с участием) М.Н. Кучеренко монография «Микроклимат производственных сельскохозяйственных зданий и сооружений» (2008 г., 623 стр.) и учебное пособие «Системы активной вентиляции для сушки биологически активного сырья» (2010 г., 148 стр.), а также научные статьи соискателя.
Разработка используется _*в курсовом и дипломном проектировании, в курсе лекций по дисциплинам «Вентиляция», «Отопление», «Кондиционирование воздуха и холодоснабжение», «Вентиляция промышленных зданий», в процессе выполнения выпускных квалификационных работ*
(в процессе выполнения лабораторных, курсовых, дипломных работ и др.)
и позволяет __*повысить качество подготовки специалистов по вопросам проектирования энергоэффективных гражданских и производственных сельскохозяйственных зданий и сооружений, что достигается в результате включения в лекционный и практический курс нового методологического подхода 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.*

Председатель комиссии:
_____Н.И. Устенков
Члены комиссии:
_____ Е.Б. Гришина
_____ Р.В. Охлопков

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
"Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет" (ННГАСУ)
Ильинская ул., д.65, Нижний Новгород, 603950 Тел./факс: (831) 430-19-36. E-mail: nir@nngasu.ru
ОКПО 02068150, ОГРН 1025203021007, ИНН/КПП 5260002707/526001001

08.09.2016 № 01.2-03/423

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по научной работе
д-р техн. наук, доцент
_____ И. С. Соболь

АКТ

о внедрении в учебный процесс результатов научных исследований кандидата технических наук, доцента КУЧЕРЕНКО Марии Николаевны

Результаты научно-исследовательских разработок, полученные к.т.н., доцентом, зав. кафедрой «Теплогазоснабжение, вентиляция, водоснабжение и водоотведение» ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет» Кучеренко Марией Николаевной по ведущейся научно-исследовательской теме: «Совершенствование аэродинамических и теплофизических показателей энергоэффективных систем обеспечения параметров микроклимата» успешно используются в учебном процессе по направлениям подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» и 08.03.01 «Строительство».

Для данных направлений по основным курсам «Строительная теплофизика», «Теоретические основы создания микроклимата», «Тепломассообмен», «Отопление», «Вентиляция» теоретические и практические результаты исследований М.Н. Кучеренко включены в лекционный курс, курсовое проектирование, выпускные работы бакалавров и магистров. Особый интерес вызывают новые системные подходы по вопросам повышения энергоэффективности зданий и сооружений различного назначения, а также научное обоснование границ использования естественных источников энергии при обеспечении требуемых параметров микроклимата.

В библиотеке университета имеются в достаточном количестве изданные (с участием) М.Н. Кучеренко монография «Микроклимат производственных сельскохозяйственных зданий и сооружений» (2008 г., 623 стр.) и учебное пособие «Системы активной вентиляции для сушки биологически активного сырья» (2010 г., 148 стр.), а также научные статьи соискателя.

Декан факультета инженерно-экологических систем и сооружений
доцент, канд. экон. наук — Ж.А. Шевченко

ООО Агрофирма «Белозерки»
Юридический адрес: 445147, Самарская область, муниципальный район Ставропольский, село В-Белозерки, ул. Мира, дом 6Г
ИНН 6382048796, КПП 638201001 ОГРН 1056382017658
Тел.: (8482) 23-44-94

АКТ
о практическом использовании результатов научных исследований,
канд. техн. наук, доцента, заведующего кафедрой
«Теплогазоснабжение, вентиляция, водоснабжение и водоотведение»
Тольяттинского государственного университета
КУЧЕРЕНКО Марии Николаевны

В практическую деятельность ООО Агрофирма «Белозерки» внедрены результаты научных исследований, полученные при непосредственном участии и под научным руководством к.т.н., доцента Кучеренко Марии Николаевны при выполнении научно-исследовательской работы «Совершенствование аэродинамических и теплофизических показателей энергоэффективных систем обеспечения параметров микроклимата»:
- метод расчета режимов работы систем активной вентиляции в хранилищах сочного растительного сырья с применением I–d–θ-диаграммы;
- оценка возможности использования естественного холода для поддержания требуемого микроклимата хранилища.

Оптимизация режимов работы систем активной вентиляции в хранилище картофеля позволила повысить эффективность хранения и снизить убыль продукции на 7 %. Достигнутый экономический эффект от внедрения составил в среднем 560 руб/т·год (в ценах 2015 года).

Генеральный директор Е.Г. Новиков

РОССИЯ САМАРСКАЯ ОБЛАСТЬ СТАВРОПОЛЬСКИЙ РАЙОН

ООО «Васильевское»

445130 Самарская область
Ставропольский район
с. Васильевка ул. Специалистов д.13, кв.1
ИНН 6382071869
КПП 638201001
ОГРН 1166313052630
vasilyevskoye@gmail.com
№ 7
«_02_» _сентября_ 2016 года.

СПРАВКА
об использовании результатов научно-исследовательской работы

ООО «Васильевское» приняты к практическому внедрению следующие результаты научных исследований, полученные при непосредственном участии и под научным руководством к.т.н., доцента Кучеренко Марии Николаевны в рамках научно-исследовательской работы «Совершенствование аэродинамических и теплофизических показателей энергоэффективных систем обеспечения параметров микроклимата»:

- метод нормирования и расчета сопротивлений теплопередаче (по удельному потоку теплоты) и сопротивлений влагопередаче (по удельному потоку влаги) наружных ограждений неотапливаемого производственного сельскохозяйственного здания (коровника на 200 голов беспривязного содержания);
- инженерная методика расчета требуемых влажностных характеристик наружных ограждений коровника;
- технические предложения по реконструкции теплового контура коровника, позволяющие повысить продуктивность сельскохозяйственного производства за счет поддержания требуемых технологических параметров микроклимата в здании коровника.

Экономический эффект от проведения реконструкции теплового контура одного здания коровника на 200 голов составил 170 000 руб.

Директор
ООО «Васильевское» Борзов С.В.

Российская Федерация

ООО СХП «ЛИК»

ИНН 6382065209 КПП 638201001

445147, РФ Самарская область, Ставропольский район, п.Висла, ул. Новая, 8
Р/с № 40702810700000014240 в ПАО «Татфондбанк» г.Казань
БИК № 049205815, к/с № 30101810100000000815

«16 » сентября 2016 г Тел: гл. бухгалтер: 23-56-57

Исх. № 32.

С П Р А В К А

об использовании результатов научно-исследовательской работы

«Совершенствование аэродинамических и теплофизических показателей энергоэффективных систем обеспечения параметров микроклимата»

ООО СХП «ЛИК» приняты к практическому внедрению следующие Результаты научных исследований, выполненных к.т.н. доцентом, заведующим кафедрой «Теплогазоснабжение»,вентиляция, водоснабжение и водоотведение ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет» Кучеренко Марией Николаевной:

- методика нормирования величины сопротивления влагопередаче наружных ограждений основанная на понятии потенциала влажности;

- инженерная методика расчета теплотехнических характеристик и влажностного режима наружных ограждений сельскохозяйственных зданий ив круглогодичном цикле эксплуатации;

-практические рекомендации по реконструкции теплового контура сельскохозяйственных производственных зданий;

-практические рекомендации по режимам работы систем обеспечения параметров микроклимата в круглогодичном цикле эксплуатации, в том числе по возможности отказа от использования искусственно генерируемой теплоты.

Повышение энергоэффективности здания достигается за счет соблюдения теплотехнических требований к конструкции наружных ограждений. Повышение эффективности сельскохозяйственного производства достигается за счет соблюдения технологических параметров микроклимата.

Директор ООО СХП «ЛИК» Н.М. Ревтов

Общество с ограниченной ответственностью
Сельскохозяйственное предприятие "Олимп-Агро"
445134, Россия, Самарская обл., Ставропольский район
Село Нижнее Санчелеево, ул. Советская, дом 52А
тел. (8482) 206-260 e-mail: olimp_agro2008@mail.ru
Р/с 40702810454400002754
в Поволжском банке ПАО "Сбербанк России" г.Самара
К/с 30101810200000000607 БИК 043601607
ИНН 6382044030 КПП 638201001 ОГРН 1026303951222
ОКПО 21288318 ОКВЭД 01.11.1

№_____ от_____

на №_____ от_____

АКТ

о практическом использовании результатов научных исследований
канд. техн. наук, доцента КУЧЕРЕНКО Марии Николаевны
на тему: «Совершенствование аэродинамических и теплофизических показателей энергоэффективных систем обеспечения параметров микроклимата»

В практической деятельности ООО СХП «Олимп-Агро» при хранении зерновых и зернобобовых культур в зернохранилище (с. Нижнее Санчелеево, Ставропольский район, Самарская обл.) использованы следующие результаты исследований М.Н. Кучеренко:

- графо-аналитический метод расчета интенсивности тепломассопереноса при сушке и хранении растительного сырья с использованием I–d–θ-диаграммы, учитывающий биологические тепловыделения продукции и изменение начальных параметров сушильного агента;
- инженерный метод расчета режимов работы систем активной вентиляции, учитывающий количественные показатели темпа самосогревания хранящейся продукции.

Экономический эффект от оптимизации режимов работы систем активной вентиляции заключается в сокращении микробиологической убыли продукции в период осенне-зимнего хранения 2014-2015 г.г. на 2,7%, что составляет в среднем 387 руб./(т·год).

Директор
ООО СХП «Олимп-Агро» Н.А. Леонтьев

ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«ПОДСТЕПКИНСКОЕ»

445143, Самарская область, Ставропольский район, с. Подстепки, ул. Производственная, 8. Тел/факс: (8482)-959-998;
ИНН/КПП 6382053027/638201001, ОГРН 1076382003170, ОКПО 80624016
Р/с 40 702 810 613 010 000 177 в РФ ОАО «РОССЕЛЬХОЗБАНК», г. Самара
БИК 043601978 кор/счет 30 101 810 900 000 000 978

_____№ _____

на № _____ от _____

АКТ
об использовании результатов диссертационной работы
к.т.н., доцента КУЧЕРЕНКО Марии Николаевны
«Совершенствование аэродинамических и теплофизических показателей энергоэффективных систем обеспечения параметров микроклимата»

ОАО «Подстепкинское» приняты к практическому внедрению следующие научные разработки М.Н. Кучеренко:
- рекомендации по выбору и способу обработки приточного воздуха при сушке и хранении сельскохозяйственной продукции разработанные на основе уточненных теплофизических моделей процессов тепломассопереноса в слое продукции;
- методики расчета времени работы систем активной вентиляции при сушке и хранении сельскохозяйственной продукции, учитывающие динамику процессов тепломассообмена в насыпи;
- результаты оценки возможности использования естественного холода (при хранении) и естественного тепла (при сушке).

Практическая апробация указанных научных разработок при эксплуатации систем активного вентилирования при сушке и хранении сельскохозяйственной продукции позволила снизить энергоемкость сельскохозяйственного производства и повысить качество продукции. Отмечается снижение убыли продукции за счет усушки и гниения на 7,5 %.

Общий экономический эффект от внедрения результатов научных исследований Кучеренко М.Н. за 2015 год составил 1 130 000 руб.

Генеральный директор А.В. Походяев

РОССИЯ, САМАРСКАЯ ОБЛ., СТАВРОПОЛЬСКИЙ Р-Н ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «Подстепкинское» ИНН 6382053027 ОГРН 1076382003170

ЗАКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «ЛУНАЧАРСК»

445145,Самарская обл, Ставропольский район, п.Луначарский, ул.Мира,4 тел.факс (8482) 231-341, тел.231-342
р/с 40702810054280100360 в Поволжском банке ПАО «Сбербанк России», Самарское отделение № 6991 в г. Самара., БИК 043601607,
к/с 30101810200000000607, ИНН 6382000378, КПП 638201001, ЕГРН 1026303951365, ОКОНХ 21120, ОКФС 16

СПРАВКА
о практическом использовании результатов научных исследований,
канд. техн. наук, доцента, заведующего кафедрой
«Теплогазоснабжение, вентиляция, водоснабжение и водоотведение»
Тольяттинского государственного университета
КУЧЕРЕНКО Марии Николаевны
на тему: «Совершенствование аэродинамических и теплофизических показателей энергоэффективных систем обеспечения параметров микроклимата»

В ЗАО «Луначарск» для дальнейшего практического использования при эксплуатации и реконструкции производственных сельскохозяйственных зданий переданы следующие результаты научных и практических исследований по повышению энергоэффективности систем обеспечения микроклимата:

- вариант реконструкции теплового контура коровника, выполненный на основе разработанной инженерной методики расчета влажностных характеристик наружных ограждений здания;
- условия и ограничения по эксплуатации здания коровника без использования искусственно генерируемой теплоты, основанные на предложенной методике нормирования сопротивления влагопередаче наружных ограждений неотапливаемых производственных сельскохозяйственных зданий.

Ожидаемый экономический эффект заключается в снижении энергоемкости и повышению долговечности здания коровника.

Директор ЗАО «Луначарск» С.А. Кисляков

ООО АГРОФИРМА Волжанин

Общество с ограниченной ответственностью
Агрофирма "Волжанин"

ООО Агрофирма "Волжанин", ИНН / КПП 6382059318 / 638201001, 445165, Самарская обл., Ставропольский р-н, Осиновка с, Полевая ул, д. 8 тел.(8482) 23-75-36 факс 23-75-36,эл.адрес ooo.volzhanin@mail.ru р/с № 40702810913010000291 в Самарский РФ АО «Россельхозбанк» г.Тольятти, *к/с 30101810900000000978 БИК 043601978*

АКТ

об практическом использовании результатов научных исследований к.т.н., доцента КУЧЕРЕНКО Марии Николаевны (ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет», кафедра «Теплогазоснабжение, вентиляция, водоснабжение и водоотведение») на тему: «Совершенствование аэродинамических и теплофизических показателей энергоэффективных систем обеспечения параметров микроклимата»

Практическое применение в деятельности ООО Агрофирма «Волжанин» при заготовке грубых кормов (с. Осиновка, Ставропольский район, Самарская обл.) получили следующие научные разработки М.Н. Кучеренко:

- методики расчета интенсивности тепломассопереноса при сушке и хранении растительного сырья с использованием I–d–θ-диаграммы, учитывающий биологические тепловыделения продукции и изменение начальных параметров сушильного агента;
- инженерный метод расчета режимов работы систем активной вентиляции, учитывающий количественные показатели темпа самосогревания хранящейся продукции;
- оценка возможности использования атмосферного воздуха как агента сушки при заготовке грубых кормов;
- рекомендации по использовании гелиосистем для интенсификации процессов сушки и технико-экономическое обоснование целесообразности использования солнечных коллекторов в системах активного вентилирования.

Экономический эффект от использования результатов исследований, выразившихся в создании, наладке и эксплуатации системы активной вентиляции при заготовке грубых кормов, работающей на неподогретом и подогретом в пассивном солнечном коллекторе воздухе (на 5…6 °С), состоит из эффекта от снижения затрат энергии и эффекта от повышения качества заготовленного сена (кормовое качество сена по данным агротехнической лаборатории сельскохозяйственного предприятия повысилось от 0,38 до 0,45 КЕ).

Общий экономический эффект от внедрения системы активной вентиляции при заготовке грубых кормов в сезон 2015 года в зафиксирован на уровне 875 000 руб.

Директор ООО Агрофирма «Волжанин» И.С.Михайлов

Общество с ограниченной ответственностью
Смарт-Хаус

Юридический адрес: 445043, Россия, Самарская область, г.Тольятти,
Южное шоссе 30, офис 18, Тел. (8482)999-059; тел./факс 42-25-72; 999-054.
Почтовый адрес: 445043,РФ, Самарская область, г. Тольятти а/я 5879
Электронный адрес: info@smart-haus.ru
ОГРН 1126320014798 ИНН 6321297241, КПП 632101001
ОКПО 11012242, ОКАТО 36440000000, ОКВЭД 74.20
Р/Сч. № 40702810954400060199 Поволжский Банк ОАО «Сбербанк России»
г.Самара, БИК 043601607, К/Сч. №30101810200000000607

СПРАВКА

о практическом использовании результатов научных исследований, канд. техн. наук, доцента, заведующего кафедрой «Теплогазоснабжение, вентиляция, водоснабжение и водоотведение» ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет» КУЧЕРЕНКО Марии Николаевны на тему: «Совершенствование аэродинамических и теплофизических показателей энергоэффективных систем обеспечения параметров микроклимата»

ООО «Смарт Хаус» приняты к практическому внедрению и включены в заявку на участие в тендере на разработку проектно-сметной документации по реализации региональной программы капитального ремонта общего имущества в многоквартирных домах, расположенных на территории Самарской области (Постановление Правительства Самарской области №707 от 29.11.2013 г.) методика расчета ожидаемых значений объемов вытяжного воздуха в системах приточно-вытяжной естественной вентиляции в многоквартирных жилых домах и разработанная на ее основе режимная карта работы комбинированной естественно-механической системы вентиляции.

Повышение энергоэффективности многоэтажного жилого дома достигается путем применения механической вентиляции в холодный период года при температуре наружного воздуха ниже –10 °С, что позволяет снизить объемы инфильтрационного воздуха и затраты теплоты на его нагрев.

Расчетная экономия тепловой энергии составляет в среднем 17,76 Гкал/год на одну секцию 9-этажного панельного дома. Объем реконструируемого жилого фонда Самарской области – 980 тыс. м^2.

Расчетный экономический эффект от внедрения комбинированных естественно-механических систем вентиляции составляет 18,19 млн. руб/год.

Генеральный директор М.А. Фомина

Общество с ограниченной ответственностью «Смарт-Хаус» ОГРН 1126320014798 Российская Федерация Самарская область, город Тольятти

Общество с ограниченной
ответственностью
«ПРОЕКТПРОМВЕНТИЛЯЦИЯ»

603005, г. Нижний Новгород,
ул. Алексеевская, 26-231
телефон/факс: (831) 428-26-02
ИНН 5260355727
КПП 526001001
ppvent@sandy.ru

«12» апреля 2016г. № 114/16

Утверждаю:
Генеральный директор
ООО «Проектпромвентиляция»

Е.Г. Ионычев
канд. техн. наук

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

в практику проектирования, строительства и эксплуатации результатов научно-исследовательской работы **Кучеренко Марии Николаевны** на тему: *«Совершенствование аэродинамических и теплофизических показателей энергоэффективных систем обеспечения параметров микроклимата»*, выполненной в Нижегородском государственном архитектурно-строительном университете

В рамках проведения Федеральной программы капитального ремонта объектов ЖКХ Нижегородской области специалистами ООО «Проектпромвентиляция» (г. Нижний Новгород) внедрены в практику проектирования, строительства и эксплуатации следующие основные положения и методики расчета систем обеспечения параметров микроклимата гражданских зданий и сооружений:

1. Физико-математическая модель системы естественной вытяжной вентиляции, позволяющая определять фактические воздухообмены в помещениях многоэтажных жилых домов при любых параметрах наружного воздуха.
2. Методика аэродинамического расчета многоэтажных жилых зданий с теплым чердаком, учитывающая влияние температуры воздуха в объеме чердака на эффективность работы систем естественной вентиляции.
3. Алгоритм автоматизированного аэродинамического расчета системы вытяжной естественной вентиляции, выполненной из типовых поэтажных блоков, в многоэтажных жилых зданиях с теплыми чердаками;
4. Режимная карта работы системы естественно-механической вытяжной вентиляции с выделением температурных диапазонов применения естественных и искусственных побудителей движения воздуха.

Результатом является устранение неравномерности воздухообменов по высоте здания и обеспечение нормируемых объемов вытяжного воздуха в круглогодичном цикле эксплуатации. Расчетная годовая экономия теплоты за счет снижения затрат на нагрев избыточных объемов инфильтрующегося воздуха составила в среднем 130,79 Гкал на один многоэтажный типовой 9-этажный жилой дом. При объеме жилого фонда 2,06 млн. м^2 расчетный экономический эффект составляет 21,18 млн. руб./год.

Ответственный исполнитель
от ННГАСУ

М.Н.Кучеренко

Главный инженер
ООО «Проектпромвентиляция»

В.Ф. Осин