

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«ИВАНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени В.И. ЛЕНИНА»

На правах рукописи



Пророкова Мария Владимировна

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ МЕРОПРИЯТИЙ
С УЧЕТОМ КОМФОРТНОСТИ МИКРОКЛИМАТА**

Специальность 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор
Бухмиров В.В.

Иваново – 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И КАЧЕСТВО МИКРОКЛИМАТА. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА	13
1.1 Актуальность проблемы энергосбережения	13
1.2 Стимулирование внедрения энергосберегающих мероприятий	17
1.3 Классификация объектов энергосбережения	19
1.4 Потенциал энергосбережения в жилых, общественных и административных зданиях.....	21
1.5 Методы оценки эффективности энергосберегающих мероприятий	24
1.6 Методы оценки комфортности микроклимата	25
1.7 Актуальность проблемы качества воздуха.....	35
1.8 Средства измерения параметров микроклимата.....	38
1.9 Моделирование процессов теплообмена в помещении здания.....	40
1.10 Программно-вычислительные комплексы для расчета движения и теплообмена в текучих средах.....	48
1.11 Выводы по главе 1.....	52
ГЛАВА 2. МЕТОД ОЦЕНКИ КОМФОРТНОСТИ МИКРОКЛИМАТА	54
2.1 Расчет уровня комфортности микроклимата	54
2.2 Теплоощущение человека в зависимости от параметров внутренней среды помещения	62
2.3 Определение характеристик внутренней среды помещений	65
2.4 Степень комфортности микроклимата	72
2.5 Определение уровня и степени комфортности учебной аудитории.....	72
2.6 Верификация метода оценки комфортности микроклимата	76

2.7 Влияние вредностей, характерных для помещений непроизводственного назначения, на уровень комфортности микроклимата	78
2.8 Влияние систем энергоснабжения на параметры внутренней среды помещений	80
2.9 Расчет уровня комфортности микроклимата в зависимости от физиологических особенностей организма человека.....	84
2.10 Выводы по главе 2.....	88
ГЛАВА 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОБМЕНА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ МИКРОКЛИМАТА В ЗДАНИЯХ НЕПРОИЗВОДСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ	90
3.1 Математическая модель процессов тепломассообмена в помещении здания с естественной вентиляцией.....	90
3.2 Экспериментальное определение характеристик внутренней среды помещений при различных типах источников теплоты	100
3.3 Определение фактического воздухообмена помещений	112
3.4 Проверка адекватности математической модели микроклимата в помещении	119
3.5 Влияние модели турбулентности на результаты моделирования.....	127
3.6 Влияние воздухообмена на микроклимат в помещении.....	132
3.7 Выводы по главе 3.....	135
ГЛАВА 4. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ ЗАДАННОГО УРОВНЯ КОМФОРТНОСТИ МИКРОКЛИМАТА.....	137
4.1 Метод оценки эффективности энергосберегающих мероприятий	137
4.2 Анализ эффективности типовых энергосберегающих мероприятий для непроизводственных зданий	140

4.3 Упрощенный метод расчета температуры в помещении общественного здания после внедрения энергосберегающих мероприятий	146
4.4 Выбор расчетных параметров микроклимата при оценке эффективности энергосберегающих мероприятий.....	150
4.5 Компьютерная программа «Определение уровня и степени комфортности помещений жилых, общественных и административных зданий»	153
4.6 Разработка концепции измерительно-вычислительного комплекса для контроля комфортности микроклимата	163
4.7 Использование критерия комфортности микроклимата при регулировании отопительной нагрузки объектов.....	166
4.8 Выводы по главе 4.....	169
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	170
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	172
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	175
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	191

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Энергосбережение и энергоэффективность являются важной составляющей в энергетической безопасности, как ресурсодобывающих стран, к числу которых относится и Россия, так и стран потребителей топливно-энергетических ресурсов (ТЭР). Актуальность данной проблемы подтверждается включением её в перечень приоритетных направлений развития науки, техники и технологий Российской Федерации, а также в перечень критических технологий Российской Федерации.

К наиболее распространенным и результативным направлениям повышения эффективности использования ТЭР относят внедрение нормативных документов, регулирующих отношения в энергетике и разработку энергоэффективных способов производства, передачи и потребления энергоресурсов путем внедрения энергосберегающих мероприятий. В настоящее время более трети объема потребления конечной энергии приходится на жилищно-коммунальный комплекс и сферу услуг. Рост потребления энергоресурсов в непроизводственном секторе продолжится за счет увеличения численности населения и повышения качества жизни людей. Учитывая структуру энергопотребления объектами непроизводственной сферы и стоимость разных видов энергоресурсов, а также ужесточение норм в области тепловой защиты зданий, наиболее распространенными и инвестиционно привлекательными энергосберегающими мероприятиями являются меры, направленные на сокращение потребления тепловой энергии, среди которых преимущество отдается различного рода герметизирующим зданию мероприятиям (наложение тепловой изоляции на наружные ограждающие поверхности, замена оконных и дверных блоков на блоки с более высоким сопротивлением теплопередаче и более низким коэффициентом воздухопроницаемости). Указанные мероприятия, безусловно, приводят к экономии тепловой энергии в натуральном и денежном выражении, однако при этом снижается комфортность микроклимата в помещениях. Герметизация зданий с естественной вентиляцией приводит к снижению воздухообмена помещений, что ухудшает микроклимат и снижает работоспособность че-

ловека. Длительное воздействие неблагоприятных факторов внутренней среды помещения на организм человека может негативно влиять на его здоровье. Поэтому разработка нового метода оценки эффективности энергосберегающих мероприятий, учитывающего как экономические показатели реализации энергосберегающего проекта, так и комфортность микроклимата в помещениях производственных (жилых, общественных и административных) зданий является актуальной задачей. Актуальность работы также подтверждается развитием энерго-сервисной деятельности в Российской Федерации, в рамках которой до заключения энергосервисного договора на реализацию проекта энергосбережения необходимо прогнозировать как положительные, так и отрицательные результаты внедрения энергосберегающих мероприятий.

Степень разработанности темы исследования.

Вывод об эффективности энергосберегающих мероприятий в системах энергоснабжения здания в настоящее время основан на анализе экономических показателей реализации проекта. При этом в проектах, связанных с системами формирования микроклимата зданий, не учитывают влияние процедуры энергосбережения на параметры внутренней среды. Методы оценки комфортности микроклимата разработаны в основном для производственных объектов, а для помещений жилых, общественных и административных зданий могут быть использованы с определенными ограничениями (по диапазону параметров микроклимата, по источникам и типам вредностей и т.п.). Обзор научно-технической литературы показал, что совместное решение задач энергосбережения и обеспечения комфортных условий пребывания человека в помещениях изучено недостаточно полно.

Объект исследования. Энергосбережение и микроклимат в зданиях производственного назначения.

Предмет исследования. Процессы теплообмена при формировании микроклимата в зданиях производственного назначения.

Цель диссертационной работы. Повышение энергоэффективности производственных зданий в целях создания комфортной для пребывания человека внутренней среды.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Проведен обзор литературы для выявления и анализа существующих методов оценки эффективности энергосберегающих мероприятий, методов анализа комфортности микроклимата помещений, методов математического описания тепломассообменных процессов при формировании микроклимата, который показал отсутствие в настоящее время методов, учитывающих влияние энергосберегающих мероприятий на комфортность микроклимата помещений.

2. Выполнены экспериментальные исследования микроклимата в помещении общественного здания для верификации разработанной математической модели процессов тепломассообмена.

3. Выполнены экспериментальные исследования влияния основных параметров внутренней среды помещений и факторов, связанных с внедрением энергосберегающих мероприятий, на комфортность микроклимата, в целях разработки нового метода оценки комфортности микроклимата зданий непромышленного назначения.

4. Предложен критерий комфортности микроклимата (уровень и степень комфортности микроклимата), учитывающий факторы, определяющие тепловой комфорт человека в помещении и качество воздушной среды, а также основные вредности, характерные для помещений непромышленного назначения.

5. Разработана математическая модель тепломассопереноса в зданиях с естественной вентиляцией для прогнозирования параметров микроклимата после внедрения энергосберегающих мероприятий, учитывающая состав воздушной среды в помещении и фактический воздухообмен. Проверена адекватность предложенной численной математической модели.

6. Разработан метод оценки эффективности энергосберегающих мероприятий с учетом комфортности микроклимата, при использовании которого можно выполнить прогноз изменения комфортности микроклимата, повысить точность определения технических и экономических характеристик проекта.

7. Разработана принципиальная схема и алгоритм функционирования измерительно-вычислительного комплекса для контроля комфортности микроклимата в помещении в целях анализа эффективности энергосберегающих процедур.

Методы исследования. В диссертационной работе использованы фундаментальные методы теории тепломассообмена, методы математического моделирования, методы экспериментальных исследований, экономические методы оценки эффективности энергосберегающих мероприятий.

Обоснование соответствия диссертации паспорту научной специальности 05.14.04 – «Промышленная теплоэнергетика».

Работа соответствует паспорту специальности: *в части формулы специальности:* «поиск структур и принципов действия теплотехнического оборудования, которые обеспечивают сбережение энергетических ресурсов, ... сбережение материальных ресурсов, ...защиту окружающей среды»; *в части области исследования специальности:* пункту 1 «Разработка научных основ сбережения энергетических ресурсов в использующих тепло системах и установках»; пункту 3 «Теоретические и экспериментальные исследования процессов тепло- и массопереноса в тепловых системах и установках, использующих тепло»; пункту 4 «Разработка и совершенствование аппаратов, использующих тепло, и создание оптимальных тепловых систем для защиты окружающей среды».

Научная новизна.

1. Разработана математическая модель процессов тепломассообмена в помещениях зданий с естественной вентиляцией, которая учитывает состав воздушной смеси в помещении и фактический воздухообмен.

2. Экспериментально получены новые данные о влиянии энергосберегающих мероприятий на воздухообмен и параметры внутренней среды помещений.

3. Предложен новый комплексный критерий комфортности микроклимата (уровень и степень комфортности микроклимата), который учитывает физиологические особенности человека, параметры внутренней среды помещения и качество воздуха, а также дополнительные вредности, характерные для зданий непромышленного назначения.

4. Разработан новый метод оценки эффективности энергосберегающих мероприятий для жилых, общественных и административных зданий, учитывающий уровень комфортности микроклимата.

5. Получена зависимость уровня комфортности микроклимата помещений от внедрения типовых энергосберегающих мероприятий, направленных на сокращение потребления тепловой энергии за счет утепления и герметизации зданий.

Практическая значимость результатов исследования заключается в следующем.

1. Применение разработанного в диссертации метода позволяет выполнить прогноз комфортности микроклимата, и, как следствие, учесть дополнительные затраты на реализацию сопутствующих мероприятий при выполнении процедуры энергосбережения, а также уточнить технические характеристики энергосберегающих проектов.

2. Разработана компьютерная программа для расчета критерия комфортности микроклимата (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016615407 от 23 мая 2016 г.).

3. Предложены номограммы для выбора параметров микроклимата в целях обеспечения заданного уровня комфортности микроклимата в помещениях зданий непромышленного назначения при внедрении энергосберегающих мероприятий.

4. Предложена принципиальная схема и алгоритм функционирования измерительно-вычислительного комплекса для контроля комфортности микроклимата в целях анализа эффективности энергосбережения.

5. Разработана установка для определения фактического воздухообмена зданий с естественной вентиляцией.

6. Разработаны предложения по совершенствованию способа регулирования тепловой нагрузки индивидуальных тепловых пунктов для обеспечения комфортной внутренней среды при минимальных затратах тепловой энергии.

Реализация результатов.

Результаты диссертационной работы рекомендованы к использованию специалистами в области энергосбережения и энергосервиса, в сфере проектирования

и эксплуатации инженерных систем, формирующих микроклимат зданий, предназначенных для длительного пребывания человека, а также переданы АО «ИВГТЭ» (г. Иваново), НКО Фонд «Энергоэффективность» (г. Ярославль), Центру комплексной энергоэффективности ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет» (г. Москва), а также внедрены в учебный процесс при повышении квалификации в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности в учебно-методическом центре ИГЭУ «Энергосбережение» и при выполнении студентами научно-исследовательских работ.

Достоверность и обоснованность результатов подтверждается использованием фундаментальных физических законов, апробированных теоретических и экспериментальных методов исследования.

Личный вклад автора.

Все результаты диссертационной работы получены автором лично под руководством научного руководителя, в том числе:

- разработан критерий комфортности микроклимата (уровень комфортности) помещений зданий непромышленного назначения;
- разработана и реализована в программно-вычислительном комплексе трехмерная модель теплопереноса в помещениях жилых, общественных и административных зданий;
- проведены натурные эксперименты по определению параметров микроклимата в помещениях зданий и величины фактического воздухообмена;
- даны рекомендации по повышению эффективности энергосберегающих мероприятий при обеспечении комфортного микроклимата.

Автор защищает:

1. Результаты натурных экспериментов по определению параметров микроклимата и воздухообмена помещений зданий с естественной вентиляцией.
2. Модель теплообмена при формировании микроклимата в зданиях с естественной вентиляцией
3. Критерий комфортности микроклимата (уровень и степень комфортности микроклимата), который учитывает тепловое состояние человека, качество

воздушной среды и основные вредности, характерные для зданий непроизводственного назначения.

4. Новый метод оценки эффективности энергосберегающих мероприятий для жилых, общественных и административных зданий, основанный на расчете уровня комфортности микроклимата, и результаты определения экономического эффекта при использовании предложенного метода.

5. Концепцию измерительно-вычислительного комплекса для оценки комфортности микроклимата непроизводственных зданий.

6. Результаты влияния на комфортность микроклимата процедуры внедрения типовых энергосберегающих мероприятий, направленных на сбережение тепловой энергии за счет утепления и герметизации зданий.

Апробация работы.

Основные положения и результаты диссертационной работы опубликованы и обсуждались:

– на 24 международных конференциях: VI, VII и VIII Международной научно-практической конференции «Повышение эффективности энергетического оборудования» (г. Иваново, 2011; г. Санкт-Петербург, 2012; г. Москва, 2013); Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (г. Москва, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017 г.г.); Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Энергия» (г. Иваново, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017 г.г.); Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (Бенардосовские чтения) (г. Иваново, 2009, 2011, 2013, 2015, 2017 г.г.); X Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» (г. Казань, 2015 г.); VI и VII Международной научно-технической конференции «Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности» (г. Ульяновск, 2013, 2017 г.г.); V и VIII Международной школе-семинаре молодых ученых и специалистов «Энергосбережение – теория и практика» (г. Москва, 2010, 2016 г.г.); Международной молодежной научной конференции «Тепломассопере-

нос в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и технологического оборудования» (г. Томск, 2017 г.);

– на пяти всероссийских конференциях: XIX Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: Эффективность, надежность, безопасность» (г. Томск, 2013); III Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве» (ТИМ'2014, г. Екатеринбург, 2014); V и VI Всероссийской научной конференции с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий» (г. Томск, 2014 и 2015 г.г.); Национальном конгрессе по энергетике (г. Казань, 2014 г.);

– на двух региональных научно-технических конференциях: V и VII Региональной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Энергия» (г. Иваново, 2010 и 2012);

– на отчетных конференциях молодых ученых ИГЭУ «Энергия инновации» и научно-практических семинарах кафедры «Теоретические основы теплотехники» ИГЭУ (Иваново, ИГЭУ, 2009 – 2016).

Публикации. Основное содержание диссертационной работы и ее результатов полностью отражено в 20 печатных работах, общим объемом 4,99 п.л., авторский вклад – 2,37 п.л., из них 2 – научные статьи в изданиях, рекомендованных ВАК, а также 4 работы – в сборниках, индексируемых в международной базе данных SCOPUS.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, списка литературы, восьми приложений и содержит 171 страницу основного текста, включая иллюстративный материал. Список литературы содержит 161 источник.

ГЛАВА 1. ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И КАЧЕСТВО МИКРОКЛИМАТА. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Энергия играет главную роль при формировании среды обитания человека. Потребление разных видов энергии является необходимым условием выживания человеческой расы, поэтому со времен древнейших цивилизаций до настоящего времени производство энергии является одним из важнейших направлений деятельности человека.

Цивилизация неразрывно связана с понятием энергии, поэтому в истории человека выделяют: эпоху мускульной силы, эпоху энергии воды, эпоху пара, эпоху электричества, эпоху атомной энергетики [161]. С развитием товарно-денежных отношений энергия в обществе накапливается не только для совершения полезной работы, но и в виде информации, денег, технологических знаний, материальных средств и общественных договоров [33]. Поскольку энергия в современном мире может быть оценена и выражена в денежном эквиваленте, она становится товаром с набором всех присущих ему свойств: энергию можно продать, купить, запасти и сохранить. Кроме того, в современном мире основой экономики отдельных районов или целых стран (Российская Федерация, Объединенные Арабские Эмираты и др.) является энергия, выраженная в запасах ископаемого топлива.

1.1 Актуальность проблемы энергосбережения

Зависимость мировой экономики от добычи энергетических ресурсов вызвала первый и самый сильный мировой энергетический кризис (1973-1974 г.). Причиной кризиса стало снижение объемов добычи нефти странами ОПЕК [80]. Главным последствием для СССР стало увеличение объемов экспорта нефти на Запад, что послужило началом зависимости экономики СССР, а затем и Российской Федерации от цен на нефть.

Поскольку энергетический кризис 1973-1974 гг. начался в США, американцы стали первыми, кто предложил законодательно закрепить необходимость сбережения энергетических ресурсов. В 1974 г. конгресс США принял закон, в соответствии с которым при реализации федеральных программ финансирования необходимо было выполнять энергетический анализ технологий и производств [33]. В США создается Управление энергетической информации (Energy Information Administration) [153] и Международное энергетическое агентство (International Energy Agency) [157.], призванные соответственно собирать и анализировать информацию о потреблении энергоресурсов и выработать на международном уровне единую стратегию в сфере рационального использования и производства топливно-энергетических ресурсов (ТЭР). В США и Европе появляются работы, посвященные единой методологии оценки энергетической эффективности производственных процессов [127], и исследовательские лаборатории в сфере проблем энергосбережения, в том числе при крупных научных центрах, например, при Национальной лаборатории имени Лоуренса в Беркли (Lawrence Berkeley National Laboratory).

В СССР аналогичные исследования проводились на Урале, где были сосредоточены наиболее энергоемкие производственные комплексы: в Уральском научном центре АН СССР, Уралэннергочермет и др. [52, 87, 131]. В результате научных изысканий был предложен метод определения энергетической эффективности современных промышленных технологий. Однако работы в данном направлении остались на уровне общественных инициатив в СССР и позднее в России. Тем не менее, метод определения энергоэффективности промышленных технологий, развиваясь в основы интегрированного энергетического анализа (ИЭА), предполагающего полный энергетический и тепломассообменный анализ [61]. Отдельные аспекты ИЭА в настоящее время закреплены в [30, 31]. В частности в ГОСТ Р 51750 в качестве «эффективного инструмента разработки энергосберегающих систем» рассматривается «функционально-экологическое проектирование (ФЭП)», объединяющее принципы функциональности и экологичности (для природы и человека) систем

[31]. Таким образом, проблемы энергосбережения и экологии рассматриваются совместно в отечественных статьях с 90-х годов XX в. [115].

Одним из первых документов в Российской Федерации, в котором указывается на необходимость энергосбережения, стал Федеральный закон № 41-ФЗ «О государственном регулировании тарифов на электрическую и тепловую энергию в Российской Федерации» от 14.04.1995 г., регламентирующий включение в себестоимость электрической и тепловой энергии затрат на энергосбережение. Затем в 1996 г. вышел один из основополагающих документов в области энергосбережения в Российской Федерации – Федеральный закон «Об энергосбережении» № 28-ФЗ от 03.04.1996 г. Данный документ предусматривал введение экономических и финансовых механизмов в области энергосбережения, а также информационное обеспечение, образование и подготовку кадров в данной области. Однако указанный документ – закон непрямого действия, целью которого было обозначение основных направлений государственной политики в области энергосбережения.

В настоящее время Россия занимает третье место в мире по объему энергопотребления (после США и Китая), а энергоемкость ВВП является самой высокой в десятке стран – крупнейших потребителей энергии [24]. Высокий показатель энергоемкости связан не только с расположением значительной части территории России в холодной климатической зоне, но и с преобладанием тяжелой промышленности в экономике страны. Однако, по оценкам специалистов [131], даже с учетом всех этих факторов, потребление энергии в России все же приблизительно на 20% выше, чем в странах с аналогичным уровнем доходов, климатическими характеристиками и структурой промышленности.

Высокая энергоемкость РФ свидетельствует о неэффективном использовании энергоресурсов, оказывает негативное влияние на экономику России, ее энергетическую безопасность, на окружающую среду и здоровье ее граждан. Как отмечают специалисты [131], реализация потенциала энергосбережения может привести к экономии до 45 % полного потребления энергии.

Анализ литературы по данному вопросу позволил сформировать четыре принципа, определяющих политику энергосбережения в России [110]:

1) Энергоресурсы имеют большое значение как для улучшения качества жизни россиян, так и для обеспечения энергетической безопасности и независимости страны.

2) Энергоресурсы должны обладать всеми признаками товара, поскольку могут создаваться, продаваться, покупаться и иными способами участвовать в товарно-денежных отношениях.

3) В XXI века будут активно использоваться нетрадиционные и возобновляемые источники энергии.

4) Приоритет при выборе и реализации энергосберегающих мероприятий будут иметь решения эффективные не только в техническом или экономическом плане, но также одновременно улучшающие микроклимат помещений.

Актуальность первых трех принципов подтверждается отношениями со странами Европы и СНГ, принятием пакетов нормативных документов в области энергосбережения, а также созданием фондов поддержки эффективных технологий: Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере [122], Фонд развития Центра разработки и коммерциализации новых технологий (СКОЛКОВО) [124], Фонд развития промышленности [121] и ряда других [132].

Однако проблеме взаимосвязи энергосбережения и комфортности микроклимата в настоящее время в России уделяется недостаточно внимания, поскольку данный вопрос время изучен недостаточно полно.

Федеральный Закон Российской Федерации от 23 ноября 2009 г. №261-ФЗ «Об энергосбережении...» [119] дает следующее определение понятия «Энергосбережение»: «Энергосбережение – реализация организационных, правовых, технических, технологических, экономических и иных мер, направленных на уменьшение объема используемых энергетических ресурсов при сохранении соответствующего полезного эффекта от их использования (в том числе объема произведенной продукции, выполненных работ, оказанных услуг)».

Аналогичные определения приведены и во многих других изданиях на данную тему, например [33, 62].

В данном определении понятия «Энергосбережение» указана не окончательная цель экономии энергии, которая, в конечном счете, заключается в удовлетворении потребностей людей (сохранении или улучшении условий их существования), а некая промежуточная технологическая или экономическая цель. Поэтому, в работе [86] дано следующее определение понятию «Энергоресурсосбережение»: «Энергоресурсосбережение – это процедура уменьшения потребления энергии с сохранением соответствующего полезного технологического и экономического эффекта от использования энергии при условии улучшения экологии существования человека:

- на локальном уровне – это создание оптимальных параметров микроклимата в помещениях;
- на глобальном уровне – это сохранение биосферы планеты Земля».

1.2 Стимулирование внедрения энергосберегающих мероприятий

Современный этап развития энергосбережения в Российской Федерации начинается с вступления в силу Федерального закона № 261 от 23 ноября 2009 г. «Об энергосбережении...» [119]. Указанный документ предусматривает наличие у крупных потребителей топливно-энергетических ресурсов, организаций с участием государства, а также организаций, связанных с добычей, передачей и распределением топливно-энергетических ресурсов, паспорта потребителя топливно-энергетических ресурсов, составляемого по результатам энергетического обследования, а также плана мероприятий по сокращению потребления топливно-энергетических ресурсов с указанием объемов и источников финансирования – программы энергосбережения.

В настоящее время можно выделить два наиболее распространенных направления энергосбережения и повышения энергетической эффективности:

- сокращение потерь энергетических ресурсов при их производстве, передаче и использовании;

– использование энергоэффективных режимов эксплуатации объектов и оборудования.

Решение указанных задач может быть выполнено путем внедрения энергосберегающих мероприятий. Стимулирование деятельности по данному направлению осуществляется, с одной стороны, путем установления ответственности за несоблюдение требований законодательства в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности [119]. С другой стороны, при реализации мер, направленных на повышение эффективности использования ТЭР, осуществляется государственная поддержка [119]: налоговые льготы, льготное кредитование, субсидирование энергоэффективного производства и строительства, стимулирование производства энергосберегающей продукции и технологий и т.д.

Для достижения предусмотренных энергетической стратегией России результатов в настоящее время реализуется государственная программа «Энергоэффективность и развитие энергетики» [82]. Планируемые затраты бюджета на мероприятия, предусмотренные программой, составляют на период с 2013 по 2020 г.г. 89499146,90 тыс. руб. [82], в том числе на Подпрограмму 1 «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности» – 31694600,50 тыс. руб. При этом под влиянием внешних и внутренних политических факторов расходы федерального бюджета на реализацию Подпрограммы претерпели ряд серьезных изменений. Так в 2016 – 2017 г.г. реализуются только три из пятнадцати мероприятий Подпрограммы: «ОМ 1.3. Информационное обеспечение и пропаганда энергосбережения и повышения энергетической эффективности», «ОМ 1.5. Выполнение научно-исследовательских работ в целях энергосбережения и повышения энергетической эффективности» и «ОМ 1.6. Обучение работников, ответственных за энергосбережение и повышение энергетической эффективности», в то время как мероприятия, направленные на развитие устойчивое развитие направления «Энергосбережение» («ОМ 1.2. Создание благоприятных условий и снижение административных и иных барьеров в целях привлечения инвестиций в область энергосбережения и повышения энергетической эффективности в Российской Федерации», «ОМ 1.4. Поддержка мероприятий (проектов) в области энергосбере-

жения и повышения энергетической эффективности в субъектах Российской Федерации», «ОМ 1.13. Развитие механизмов финансовой поддержки реализации проектов в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности» и т.д.), позволяющих обеспечить развитие нормативной базы в сфере энергосбережения, снизить административные барьеры и привлечь дополнительные средства на реализацию политики энергосбережения, остаются без государственной поддержки.

1.3 Классификация объектов энергосбережения

Разнообразие рекомендуемых к внедрению энергосберегающих мероприятий можно классифицировать либо по типу сберегаемого ресурса, либо по системам энергоснабжения. Данный вид классификации является наиболее распространенным. Выделяют энергосберегающие мероприятия, направленные на сокращение потребления электрической, тепловой энергии, моторного топлива, природного газа, котельного топлива (мазута, угля, газа и т.п.), сжатого воздуха и т.д. [13, 89, 92, 133]. Соответственно энергосберегающие мероприятия рекомендованы к внедрению в системах электро-, тепло-, топливо-, газо-, воздухообеспечения.

Поскольку энергия в процессе своего существования при переходе от источника до потребителя претерпевает ряд преобразований, связанных, в том числе, с потерей части энергии, то для каждого типа энергоресурсов выделяют энергосберегающие мероприятия при производстве энергоресурса, его передаче и потреблении. С этой точки зрения, например, для электрической энергии энергосберегающие мероприятия подразделяют на решения для объектов генерации (ТЭС, ГЭС, АЭС, автономные электрогенераторы и т.д.), для электрических сетей и трансформаторных подстанций и для потребителей электрической энергии.

Потребителей энергетических ресурсов, в свою очередь, можно подразделить на объекты добычи (производства, генерации) энергетических ресурсов, производственные объекты и объекты непромышленного назначения, к которым относятся здания жилые, общественные и административные.

Структура потребления конечной энергии по основным видам экономической деятельности и жилищному сектору по данным Росстата приведена на рисунке 1.1 [75]. Анализ рисунка показывает, что более трети объема потребленных энергетических ресурсов приходится на жилищно-коммунальный комплекс и сферу услуг. Причем значительный рост потребления населением энергетических ресурсов (с 9,6 до 27,8%) произошел в 1990-2000 гг. за счет падения потребления энергии в промышленном секторе [20].

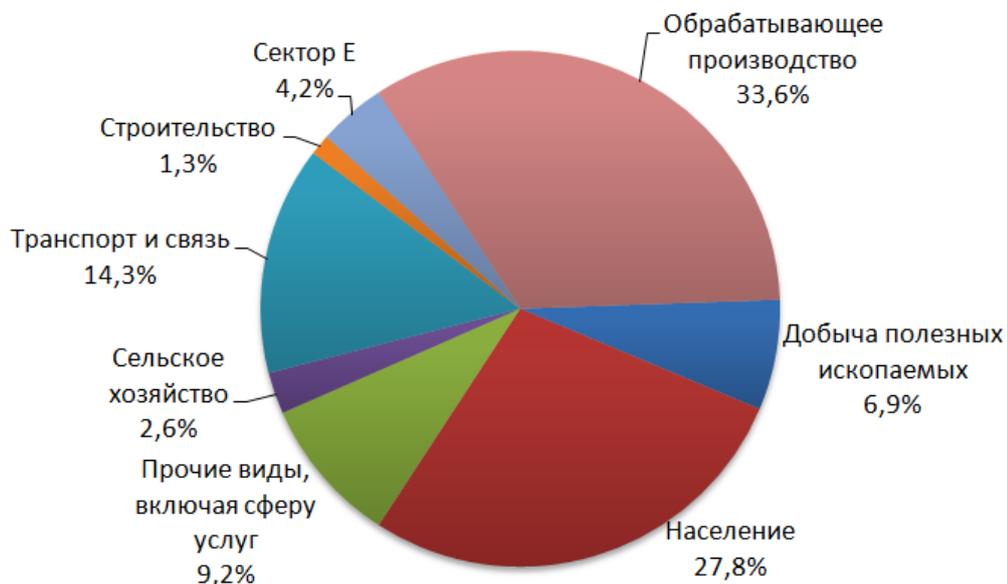


Рисунок 1.1 – Структура потребления конечной энергии по основным видам экономической деятельности России в 2011 г. [20]

Увеличение потребления энергоресурсов в непроизводственном секторе произошло за счет увеличения численности населения, роста его доходов, увеличения жилой площади, приходящейся на одного человека и, как следствие, роста потребности в электрической, тепловой энергии, воде, увеличения количества устройств и электробытовых приборов.

По мнению аналитиков [20, 84, 134], увеличения потребления энергетических ресурсов промышленным сектором в настоящее время ожидать не приходится, поскольку активно происходит модернизация производств и переход на конку-

рентоспособные, энергоэффективные, современные технологии, внедряются ВИЭ, в том числе для покрытия собственных нужд производственных комплексов.

Таким образом, энергосбережение в непромышленном секторе потребителей топливно-энергетических ресурсов, к которым относятся жилые, общественные и административные здания, является в настоящее время *актуальной задачей*.

1.4 Потенциал энергосбережения в жилых, общественных и административных зданиях

Анализ структуры энергопотребления зданий жилого, общественного и административного назначения [17, 33, 104, 133] показывает, что большая часть получаемых ТЭР приходится на тепловую энергию (рис. 1.2). По этой причине, а также с учетом высокой стоимости данного ресурса наиболее часто в зданиях внедряются энергосберегающие мероприятия, направленные на сокращение потребления тепловой энергии.

Распределение тепловой энергии по видам тепловых потерь через элементы конструкции здания приведено на рис. 1.3 [33].

Согласно исследованиям [33], здания, построенные в России до 1990 г. по типовым проектам, обладают значительным потенциалом в области энергосбережения, потому что в советский период проводилась политика «дешевых энергоносителей» и была недостаточно разработана научно-техническая документация по тепловой защите зданий в строительстве.

Потенциал повышения энергоэффективности в системах, формирующих микроклимат зданий (отопления, вентиляции и кондиционирования), обуславливает многообразие энергосберегающих мероприятий в данной области.

В работе [109] выделяется три подхода к энергосбережению в системах энергоснабжения зданий:

– увеличение точности регулирования расходуемой тепловой энергии (узлы автоматического управления тепловой нагрузкой, термостаты, регулирование расхода и температуры приточного воздуха);

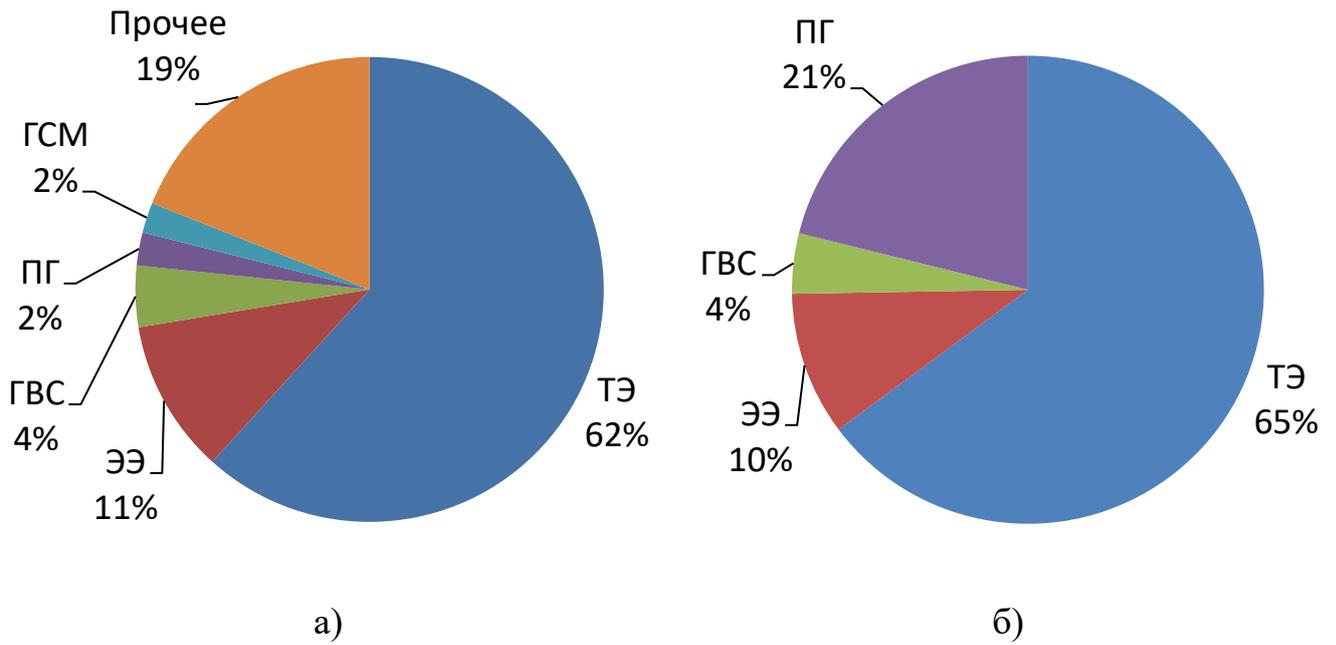


Рисунок 1.2 – Структура энергопотребления:

а – общественные и административные здания; б – жилые здания; ГСМ – горюче-смазочные материалы; ПГ – природный газ; ГВС – горячее водоснабжение; ЭЭ – электроэнергия; ТЭ – тепловая энергия

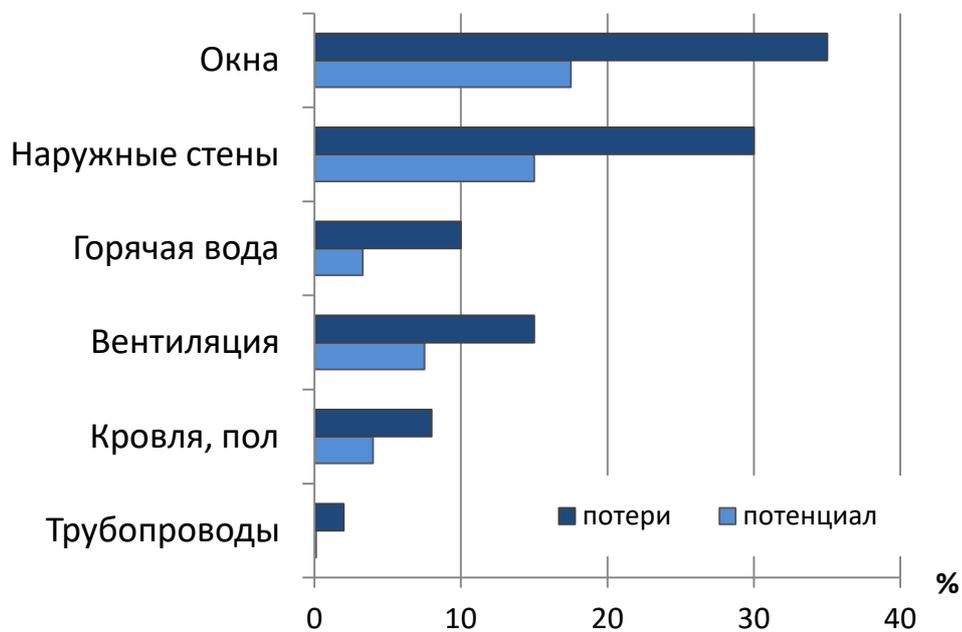


Рисунок 1.3 – Распределение тепловой энергии в зданиях и потенциал энергосбережения

- использование тепловой энергии низкопотенциальных источников (утилизаторы теплоты, тепловые насосы);

- улучшение теплотехнических характеристик ограждающих конструкций и элементов систем энергоснабжения (повышение термического сопротивления теплопередачи ограждающих конструкций, применение теплоотражающих экранов, увеличение герметизации зданий).

Поскольку значительный потенциал энергосбережения заключается в модернизации ограждающих конструкций зданий (рис. 1.3), то наиболее целесообразным является внедрение энергосберегающих мероприятий, повышающих теплозащитные характеристики стен, окон и перекрытий здания. Утепление и герметизация зданий за счет наложения тепловой изоляции или замены отдельных элементов ограждающих конструкций естественно приводит к сокращению тепловых потерь и, как следствие, снижению требуемого количества теплоты для отопления. Однако при этом, как показывают исследования [11, 46, 64, 110], в зданиях с естественной вентиляцией ухудшаются гигиенические условия пребывания людей вследствие изменения параметров микроклимата и условий воздухообмена: снижается приток свежего воздуха, повышается относительная влажность воздуха, увеличивается вероятность появления плесени на внутренней поверхности ограждающих конструкций, что также отрицательно воздействует на качество воздуха в помещении [128]. Проблема ухудшения качества воздуха при применении оконных блоков с повышенной герметичностью в европейских странах решается путем дополнительных мероприятий, способствующих увеличению притока воздуха (установка воздушных клапанов, систем механической вентиляции) [68]. В Российской Федерации повсеместное использование энергоэффективных герметичных окон не сопровождается необходимым анализом влияния мероприятия на эффективность работы системы вентиляции и на микроклимат помещения. Поэтому, при решении проблемы повышения эффективности использования ТЭР в зданиях, предназначенных для длительного пребывания людей, необходимо учитывать уровень комфортности помещений.

Актуальность совместного решения задач обеспечения комфортных для человека условий внутренней среды и энергосбережения подтверждается включением в перечень первоочередных мер мероприятий по автоматическому регулированию тепловой нагрузки общественных и административных зданий в зависимости от температуры внутренней го воздуха [83], а также исследованиями [21, 23, 117, 118]. Так, например, в разработанном НП «АВОК, ОАО «ЦНИИПромзданий» и ООО «НПО ТЕРМЭК» стандарте «Здания жилые и общественные. Рейтинговая система оценки устойчивости среды обитания» [102] такие факторы, как комфорт, качество и экологичность внутренней и внешней среды, рациональное потребление энергоресурсов, энергосбережение и энергоэффективность входят в число определяющих при оценке устойчивости среды обитания человека, основным принципом которой является «удовлетворение своих потребностей в комфортной среде проживания и выполнения общественных функций посредством использования жилых и общественных зданий без снижения уровня такой возможности для последующих поколений». В авторский коллектив указанного документа вошли известные специалисты в области энергосбережения и теплотехники, среди которых Ю.А. Табунщиков, М.М. Бродач, Е.О. Шилькрот, В.И. Ливчак, Н.В., Ю.В. Миллер, Н.В. Шилкин и другие.

1.5 Методы оценки эффективности энергосберегающих мероприятий

Реализация энергосберегающих мероприятий с целью повышения эффективности потребления ТЭР является актуальной задачей. Для оценки целесообразности решений, повышающих эффективность использования топливно-энергетических ресурсов, используют разные методы, основанные на оценке потенциала энергосбережения и расчете экономических показателей реализации проекта (чистого дисконтированного дохода проекта, его срока окупаемости (простого или дисконтированного), внутренней нормы доходности и т.д.) [14, 53, 56, 70, 89, 109]. Сравнительная характеристика методов оценки эффективности энергосберегающих мероприятий приведена в таблице в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Методы оценки эффективности энергосберегающих мероприятий

Метод	Достоинства метода	Недостатки метода
Проведение натуральных экспериментов и испытаний	Позволяет выявить эффективность конкретных мероприятий для конкретных объектов	Значительные временные и финансовые затраты
Математическое моделирование здания как единой энергетической системы и определение энергопотребления за характерные периоды времени	Высокая точность предсказания результатов	Большое количество исходных данных для создания модели и сложность создания модели
Анализ результатов применения аналогичных энергосберегающих решений в системах климатизации и теплоснабжения эксплуатируемых зданий	Наглядность	Укрупненные методы, не учитывающие особенностей конкретных объектов
Использование данных об эффективности энергосберегающих решений, установленных фирмами – производителями энергоэффективного оборудования	Доступность	Низкая достоверность предоставляемой информации
Экспересс-методы	Минимальные временные затраты	Укрупненные методы, не учитывающие особенностей конкретных объектов

1.6 Методы оценки комфортности микроклимата

Поскольку в качестве объекта исследования выбраны энергосбережение и микроклимат в жилых, общественных и административных зданиях, выполнен обзор методов оценки комфортности микроклимата помещений с точки зрения норм, используемых при проектировании систем, формирующих микроклимат зданий, а также с точки зрения методов, учитывающих восприятие параметров микроклимата человеком.

1.6.1 Нормы, регулирующие параметры микроклимата в помещении (Российская Федерация)

В соответствии с СП 60.13330.2012 «Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха» (Актуализированная редакция СНиП 41-01-2003) [99], основной

целью функционирования систем, обеспечивающих условия для нахождения человека в помещении (систем отопления, вентиляции и кондиционирования), является поддержание заданных значений параметров микроклимата. При этом с точки зрения находящегося в помещении человека:

- система вентиляции должна обеспечивать допустимый микроклимат и качество воздуха;
- система кондиционирования должна обеспечивать оптимальные метеорологические условия;
- система отопления должна поддерживать нормируемую температуру воздуха.

При отоплении и вентиляции помещений параметры микроклимата должны находиться в пределах допустимых значений, при кондиционировании воздуха – в пределах оптимальных [99]. Диапазон оптимальных и допустимых параметров микроклимата для обслуживаемой зоны помещений жилых, общественных и административных зданий приведен в ГОСТ 30494 «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях» [27].

В соответствии со Сводом Правил [99] «Качество воздуха в помещениях жилых и общественных зданий следует обеспечивать согласно ГОСТ 30494 и ГОСТ ЕН 13779 необходимой величиной воздухообмена в помещениях».

СанПин 2.1.2.2645 «Санитарно-эпидемиологические требования к условиям проживания в жилых зданиях и помещениях» [90] устанавливают допустимые параметры микроклимата в помещениях жилых зданий, а также определяют допустимый перепад между температурой воздуха помещений и температурой поверхностей стен, который не должен превышать 3 °С, и допустимый перепад между температурой воздуха помещений и пола (не более 2 °С).

ГОСТ 30494 «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях» содержит определения «оптимальные» и «допустимые» параметры микроклимата, а также устанавливает общие требования к ним и к качеству воздуха обслуживаемой зоны помещений жилых, общественных и административных и бытовых зданий, а также вводит классификацию помещений в зависимости от состояния и длительности пребывания в них людей.

Оптимальные параметры микроклимата [27] – сочетание значений показателей микроклимата, которые при длительном и систематическом воздействии на человека обеспечивают нормальное тепловое состояние организма при минимальном напряжении механизмов терморегуляции и ощущение комфорта не менее чем у 80% людей, находящихся в помещении.

Допустимые параметры микроклимата [27] – сочетание значений показателей микроклимата, которые при длительном и систематическом воздействии на человека могут вызвать общее и локальное чувство дискомфорта, ухудшение самочувствия и понижение работоспособности при усиленном напряжении механизмов терморегуляции и не вызывают повреждений или ухудшений состояния здоровья.

Параметры, характеризующие микроклимат помещений [27] – температура воздуха, скорость движения воздуха, относительная влажность воздуха, результирующая температура помещения, локальная асимметрия результирующей температуры.

При этом, несмотря на то, что ГОСТ 30494 называется «Параметры микроклимата в помещениях», качество воздуха среди параметров микроклимата не упоминается, хотя требования к качеству воздуха в документе прописаны.

ГОСТ 30494 [27] вводит классификацию помещений по качеству воздуха на основе содержания CO_2 , поскольку углекислый газ «...является хорошим индикатором биологических выделений от человека. Классификация по концентрации CO_2 широко применяется для помещений, в которых находятся люди, но запрещено курение и загрязнения являются, в основном, следствием метаболизма человека».

Допустимые параметры микроклимата для помещений жилых зданий совпадают со значениями, приведенными в СанПин 2.1.2.2645 [90]. Значение локальной асимметрии результирующей температуры, под которой понимается разность результирующих температур в точке помещения, определенных шаровым термометром для двух противоположных направлений, должно быть не более $2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ для оптимальных показателей микроклимата и не более $3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ – для допустимых.

Требования ГОСТ 30494 [27] в части допустимых параметров микроклимата являются обязательными кроме локальной асимметрии результирующей температуры.

Технические требования к проектированию систем вентиляции и кондиционирования воздуха в нежилых зданиях, в которых могут находиться люди, устанавливает также ГОСТ Р EN 13779-2007 [29], который является неполным переводом документа EN 13779 «Ventilation for non-residential buildings – Performance requirements for ventilation and room-conditioning systems» («Вентиляция в нежилых зданиях. Технические требования к системам вентиляции и кондиционирования»). При этом документ не рассматривает здания с естественной вентиляцией. Указанные в документе классы помещений по содержанию CO₂, а также расходы воздуха на 1 человека для помещений соответствующего класса дублируются в разделе 5 и Приложении В ГОСТ 30494 [27]. Однако применение указанных норм затруднено, поскольку не согласуется с Российским законодательством, например, с СП 60.13330.2012 [99].

1.6.2 Нормы, регулирующие параметры микроклимата в помещении (Европейский Союз)

Стандарт EN 13779 определяет категории качества микроклимата внутри помещений (I – высокий уровень; II – нормальный уровень; III – удовлетворительный уровень; IV – прочее). При определении параметров микроклимата стандарт ссылается на EN 15251 «Indoor Environmental Input Parameters for Design and Assessment of Energy Performance of Buildings Addressing Air Quality, Thermal Environment, Lighting and Acoustics» («Исходные параметры микроклимата помещений для проектирования и оценки энергетической эффективности зданий в отношении качества воздуха, теплового комфорта, освещения и акустики») [141].

Указанный стандарт рассматривает восприятие человеком параметров микроклимата с точки зрения теплового баланса его тела. На этом подходе основано вычисление показателя Predicted Mean Vote (PMV) – прогнозируемая средняя оценка уровня теплового комфорта [148]:

$$\begin{aligned}
 PMV = & (0,303e^{-0,036q_{MT}} + 0,028)((q_{MT} - q_p) - 3,05 \cdot 10^{-3}(5733 - 6,99(q_{MT} - q_p) - \\
 & - p_e) - 0,42((q_{MT} - q_p) - 58,15) - 1,7 \cdot 10^{-5} q_{MT}(5867 - p_e) - \\
 & - 0,0014q_{MT}(34 - T_e) - 3,96 \cdot 10^{-8} f_o((T_o + 273)^4 - (T_{w,p} + 273)^4) - \\
 & - f_o \alpha (T_o - T_e),
 \end{aligned} \tag{1.1}$$

$$\begin{aligned}
 T_o = & 35,7 - 0,028(q_{MT} - q_p) - 0,155R_o(3,96 \cdot 10^{-8} f_o((T_o + 273)^4 - \\
 & - (T_{w,p} + 273)^4) - f_o \alpha (T_o - T_e));
 \end{aligned} \tag{1.2}$$

$$\begin{aligned}
 \alpha = & 2,38(T_o - T_e)^{0,25} \text{ при } 2,38(T_o - T_e)^{0,25} > 12,1w_e^{0,5} \text{ и} \\
 \alpha = & 12,1w_e^{0,5} \text{ при } 2,38(T_o - T_e)^{0,25} < 12,1w_e^{0,5} \\
 f_o = & 1 + 0,29R_o \text{ при } R_o \leq 0,5 \text{ кло } (0,078 \text{ м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}) \text{ и} \\
 f_o = & 1,05 + 0,1R_o \text{ при } R_o > 0,5 \text{ кло } (0,078 \text{ м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт});
 \end{aligned} \tag{1.3}$$

где q_{MT} – метаболизм человека, Вт/м²;

q_p – энергозатраты на совершение работы сотрудником, Вт/м²;

p_e – парциальное давление водяного пара, Па;

T_e – температура воздуха, °С;

f_o – коэффициент прикрытия одеждой части тела по отношению к голой коже;

$T_{w,p}$ – средняя радиационная температура, °С;

α – коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м²·°С);

R_o – коэффициент теплоизоляции одежды, кло;

$w_{o,B}$ – относительная подвижность воздуха в помещении, м/с:

$$w_{o,e} = w_e + 0,005(q_{MT} - 58), \tag{1.4}$$

где w_e – средняя подвижность воздуха в помещении, м/с.

На основе PMV рассчитывается показатель Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD) – прогнозируемый процент недовольных качеством микроклимата людей:

$$PPD = 100 - 95e^{-(0,03353PMV^4 + 0,2179PMV^2)}. \tag{1.5}$$

Поскольку ощущение тепла у людей наступает при различном сочетании параметров микроклимата, значение данного показателя всегда будет отличным от нуля.

В зависимости от значений PMV и PPD помещения по качеству микроклимата подразделяют на 4 категории (таблица 1.2).

Таблица 1.2 – Категории помещений в зависимости от качества микроклимата

Категория	PPD, %	PMV, %	Уровень качества микроклимата
I	< 6	$-0,2 < PMV < 0,2$	Высокий: рекомендуется для помещений, в которых присутствуют очень чувствительные люди с особыми требованиями: пожилые люди, инвалиды, больные люди, маленькие дети
II	< 10	$-0,5 < PMV < 0,5$	Нормальный: следует использовать для вновь строящихся и реконструируемых зданий
III	< 15	$-0,7 < PMV < 0,7$	Удовлетворительный: может использоваться для существующих зданий
IV	> 15	$PMV < -0,7$ или $0,7 < PMV$	Прочее: категория может быть использована только ограниченное время года

Кроме рекомендаций по значениям PMV и PPD , стандарт EN 15251 содержит рекомендуемые значения температуры, влажности, энергозатрат, теплоизоляции одежды, поступления свежего воздуха, который складывается из расхода воздуха на одного человека (в зависимости от категории качества микроклимата и PPD) и расхода на 1 м^2 пола (в зависимости от выделения вредностей в помещении), и т.д. Присутствующая в ГОСТ 30494 [27] локальная асимметрия результирующей температуры рассматривается в Европейском законодательстве в документе EN ISO 7730 [148].

Таким образом, действующие в Европейском Союзе документы, нормирующие параметры микроклимата в помещениях, предназначенных для длительного пребывания людей, большое внимание уделяют комплексному влиянию параметров микроклимата на человека. Выбор поддерживаемых в обслуживаемой зоне помещений параметров микроклимата основан на обеспечении для максимально возможного количества людей теплового комфорта.

Однако приведенные показатели теплового комфорта не учитывают качество воздушной среды, как важный фактор, напрямую оказывающий влияние на ощущение комфорта человека в помещении. Расчет показателей PMV и PPD ос-

нован на использовании большого количества эмпирических коэффициентов (формулы (1.1) – (1.5)), при этом границы использования расчетных выражений не определены. Усложняет расчет также необходимость выполнения итерационных вычислений для определения значений температуры поверхности одежды (T_o) и коэффициента конвективной теплоотдачи (α).

1.6.3 Интегральные методы оценки комфортности микроклимата

К недостаткам действующих в Российской Федерации норм, устанавливающих параметры комфортного микроклимата, можно отнести:

– во-первых, пренебрежение взаимным влиянием параметров микроклимата друг на друга, поскольку, например, наличие источников радиационного излучения в помещении может в некоторых случаях компенсировать пониженную температуру воздуха [129];

– во-вторых, необходимость применения дорогостоящего измерительного оборудования (или комплекса из нескольких измерительных приборов).

Решению задачи определения комфортных для человека условий внутренней среды помещений производственных, общественных и жилых зданий посвящены работы многих зарубежных и отечественных ученых [10, 50, 51, 54, 55, 64, 67, 69, 76, 85, 108, 111, 154, 156].

В области исследований, посвященной проблемам микроклимата, можно выделить ряд работ, в которых параметры, определяющие комфортность микроклимата, объединены и представлены в виде комплексных критериев.

В.Н. Богословский в работе [10] сформулировал два условия комфортного пребывания человека в помещении. Первое условие гласит: «комфортной будет такая температурная обстановка, при которой человек, находясь в центре помещения, не испытывает перегрева или переохлаждения». Первое условие комфортности для холодного и теплого периода года математически может быть представлено в виде [10]:

$$\begin{aligned} T_c^X &= 1,57T_{рез} - 0,57T_g \pm 1,5; \\ T_c^T &= 1,5T_{рез} - 0,5T_g \pm 1,5, \end{aligned} \quad (1.6)$$

где $T_{рез}$ – результирующая температура помещения; $^{\circ}\text{C}$; T_g – температура воздуха в обслуживаемой зоне, $^{\circ}\text{C}$.

На основе исследований Богословского В.Н. была разработана таблица допустимых и оптимальных параметров микроклимата для помещений разных категорий для теплого и холодного периода года, представленная в ГОСТ 30494 [27].

Второе условие комфортности ограничивает температуру нагретых и охлажденных поверхностей в помещении. Максимальная и минимальная температуры поверхностей в холодный период года ограничены неравенствами [10]:

$$\begin{aligned} T_n^{\max} &\leq 19,2 + 8,7\varphi_{ч-н}; \\ T_n^{\min} &\geq 23 - 5\varphi_{ч-н}, \end{aligned} \quad (1.7)$$

где $\varphi_{ч-н}$ – коэффициент облученности человека от нагретых (охлажденных) поверхностей.

Второе условие комфортности нашло широкое применение в исследованиях, посвященных расчету лучистых систем отопления.

Основным недостатком предложенных В.Н. Богословским условий комфортности является неучет влажности, подвижности и качества воздуха.

В работах И. Гриффитса и Д. Мак-Интайра [147] в качестве критерия комфортности микроклимата использована величина «векторной радиационной температуры», которая учитывает температуру воздуха и падающее на человека тепловое излучение. Данная методика позволяет при оценке комфортности микроклимата помещений учесть асимметрию падающего на человека теплового излучения, но при этом остаются неучтенными такие важные характеристики микроклимата, как относительная влажность, подвижность и качество воздуха (рис. 1.4).

В работах С.Х. Гейджа и Б. Харрингтона [146] при определении комфортных для человека условий внутренней среды помещения предложено использовать «оперативную температуру» – «температуру такой окружающей среды, в которой тело человека путем излучения и конвекции выделяет столько же теплоты,

сколько в среде с одинаковой температурой воздуха и поверхностью ограждений при скорости воздушного потока максимум 0,07-0,08 м/с». Однако предложенный метод не учитывает влажностный режим помещения и качество воздушной среды.

Максимович В.А. в своей работе [67] использовал понятие «критерий комфортности микроклиматических условий», которое объединяет температуру, относительную влажность, подвижность воздуха и содержание пыли. Данная методика была разработана для производственных помещений с большими выделениями пыли и не учитывала радиационное излучение и качество воздуха.

Исследования Олесена С., Фангера П., Нильсена О. и Дженсена П. [156] посвящены разработке диаграмм комфортности. По рекомендациям авторов при проектировании систем отопления используют 28 диаграмм, которые можно разбить на три группы. В первую группу входят 12 диаграмм, построенных при разных значениях относительной влажности и подвижности воздуха для средней радиационной температуры помещения, под которой понимается осредненная по площади температура внутренних ограждающих поверхностей помещения, в том числе отопительных приборов. Ко второй группе относят четыре диаграммы, построенные по температуре воздуха и средней радиационной температуре помещения для разных значений подвижности воздуха. Третья группы включает 12 диаграмм, построенных для различных значений подвижности и температуры воздуха и относительной влажности, равной 50%. Достоинством указанных диаграмм является удобное и быстрое определение сочетания параметров микроклимата, соответствующих комфортному состоянию человека.

Основным недостатком метода определения комфортности по диаграммам Олесена и Фангера является ограниченность рабочего поля подвижностью воздуха 1,5 м/с и низкая точность графического определения параметров комфортности.

Бедфорд Т., Лизе В., Гэй Ф., Мак-Нолл П.Е. и Биддисон Р.Е. [140, 149, 154] посвятили свои исследования разработке диаграмм теплоощущений, в которых комфортное состояние человека определяется соотношением радиационной температуры и температуры воздуха. Пример подобной диаграммы приведен на рисунке 1.4.

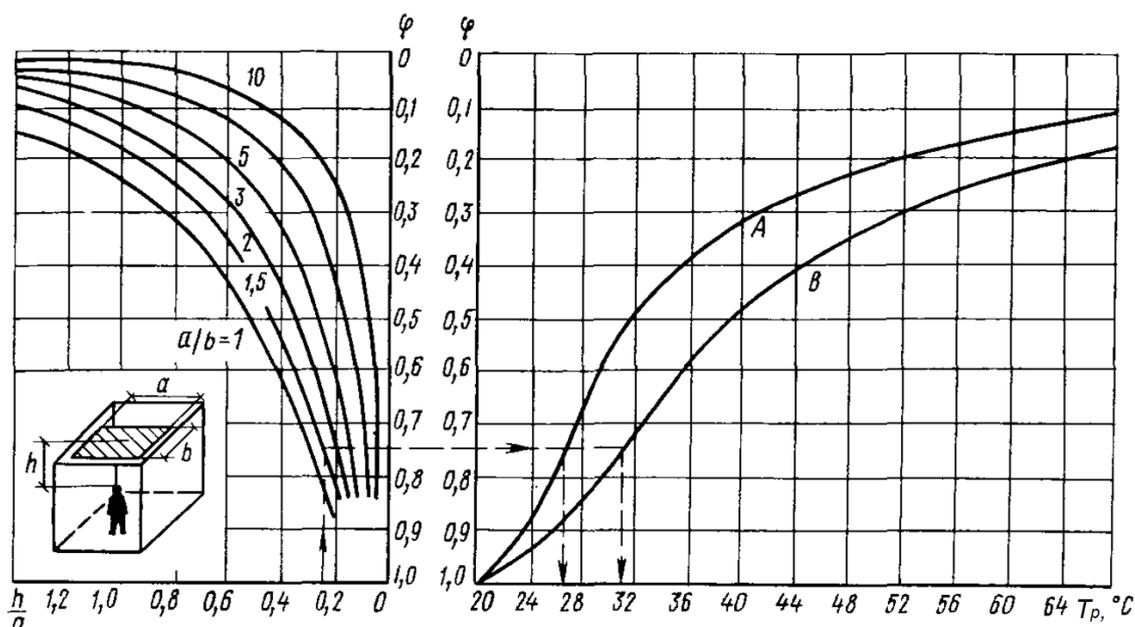


Рисунок 1.4 – Диаграмма оценки теплоощущения при лучистом потолочном отоплении (по данным Кренко, Коллмара, Лизе)

Диаграмма Кренко, разработанная при использовании исследований Кренко и Лизе, долгое время применялась на территории Венгрии для расчета систем лучистого отопления. В зависимости от габаритов помещения рисунок позволяет подобрать радиационную температуру помещения для обеспечения «физиологически приемлемого теплоощущения» для сидящих людей (кривая А) и стоящих (кривая В) при их кратковременном облучении. Однако диаграммы теплоощущения не учитывают влажность воздуха, а некоторые из них можно использовать только в производственных помещениях, где подвижность воздуха не превышает 0,15 м/с. Специфика диаграмм определяется областью исследований указанных ученых [69, 140, 146, 147, 149, 154, 156], которые сосредоточили свое внимание на изучении влияния на человека радиационного отопления.

Стареева М.О. и Кочетов О.С. [50, 51] разработали шкалу комфортности параметров микроклимата для производственных помещений: 1 – очень жарко, 2 – слишком тепло, 3 – тепло, но приятно, 4 – чувство комфорта, 5 – прохладно, но приятно, 6 – холодно, 7 – очень холодно.

Соответствие параметров микроклимата тому или иному уровню шкалы определяется по формуле, аппроксимирующей результаты экспериментальных ис-

следований и учитывающей температуру воздуха в рабочей зоне, температуру окружающих поверхностей, относительную влажность и подвижность воздуха. Анализируется также содержание пыли в воздухе рабочей зоны помещения. Предложенная методика определения комфортных параметров микроклимата учитывает специфику производственных помещений. Для зданий непроизводственного назначения применимость разработанной шкалы не рассматривалась.

В ходе экспериментов Кренко [69], при проведении которых измерялись теплотехнические характеристики помещения (температура поверхностей, воздуха и шарового термометра), была разработана шкала теплоощущений Кренко, которая давала физиологическую оценку комфортности микроклимата по субъективным теплоощущениям испытуемых: холодно (-3), прохладно (-2), приятная прохлада (-1), приятно (0), приятное тепло (+1), тепло (+2), очень тепло (+3).

По аналогичному принципу была сформирована шкала свежести воздуха Бедфорда-Вернона-Вернера, которая давала оценку качеству воздуха по субъективному восприятию его человеком: очень душно (1), душно (2), среднее состояние (3), свежо (4), очень свежо (5) [69].

К основным недостаткам рассмотренных выше методов комплексной оценки комфортности микроклимата помещений следует отнести:

- специфику объектов, к которым данные способы применимы;
- ограниченность применения по одному из параметров микроклимата;
- отсутствие в большинстве методик контроля качества воздуха;
- ограниченность применения существующих методик из-за необходимости большого количества измерительных приборов для определения характеристик воздушной среды.

1.7 Актуальность проблемы качества воздуха

Результаты российских и зарубежных исследований, посвященные влиянию эффективности работы систем отопления, вентиляции и кондиционирования на комфортность микроклимата помещений и связи микроклимата с самочувствием

и работоспособностью человека [34, 64, 73, 76, 106, 112], показывают, что организация комфортного микроклимата с целью сохранения здоровья и работоспособности людей является актуальной проблемой. Например, по результатам исследований Национального института по безопасности жилья и здоровья США (2002 г.), сделан следующий вывод: «Один миллион зданий в США имеет плохое качество внутреннего воздуха, в результате чего снижается производительность труда, и величина этих потерь достигает 60 миллиардов долларов в год. Более половины проблем с качеством внутреннего воздуха связаны с непрофессионализмом в проектировании систем вентиляции и кондиционирования воздуха» [110].

На Международной конференции по архитектуре и качеству окружающей среды (Тяньцзянь, Китай, 13 мая 2004 г.) П. Оле Фангер отметил, что «ежедневно около 5 тысяч человек умирает от плохого качества внутреннего воздуха» [110].

Национальное агентство Финляндии по новым технологиям опубликовало показатели влияния на здоровье людей и финансовые потери «синдрома больного здания» (см. табл. 1.3) [110].

Исследования ученых Гарварда [110] показали, что высокое качество воздуха в помещениях, где осуществляется умственная деятельность, положительно сказывается на способности людей мыслить, запоминать и понимать. Ученые наблюдали за 24 добровольцами, которые работали в разных условиях по качеству воздуха (разное содержание углекислого газа и прочих загрязнений). При этом было установлено, что подопытные на 61% лучше выполняли тестовые задания, когда находились в помещении с низким уровнем загрязнения воздуха.

Если же в помещении дополнительно снижалась концентрация углекислого газа, результаты были лучше более чем в два раза.

Исследования по влиянию качества воздуха на работоспособность человека были также проведены в Дании, а затем повторены в Швеции [118]. Результаты исследований показали, что производительность работы офисных служащих в помещении с хорошим качеством воздуха выше, и у них было отмечено меньше ошибок (рис. 1.5, 1.6).

Таблица 1.3 – Показатели влияния на здоровье людей и финансовые потери синдрома «больного здания»

Последствия проявления синдрома «больного здания»	Финансовые потери, вызванные «синдромом больного здания», евро в год	Условия, включенные в расчеты
Увеличение числа случаев аллергических реакций	1,18 миллиарда	30 % стоимости всех аллергических заболеваний (в условиях работы в офисе 600 000 служащих)
Отпуск по болезни	0,8 миллиарда	15 % служащих отсутствовали по причине «плохого» воздуха в помещении
Снижение производительности труда	0,2 миллиарда	Уменьшение офисных служащих на 10 %. Общая сумма заболевших 170 миллионов, половина которых заболела по причине «плохого» воздуха
Инфекционные заболевания	84 миллиона	
Заболевание раком легких вследствие радонового загрязнения помещений	34 миллиона	450 случаев в год, стоимость одного случая 75 000 евро

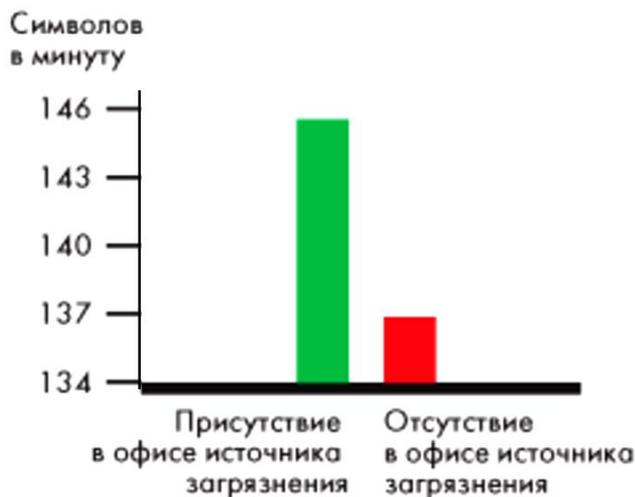


Рисунок 1.5 – Влияние загрязнения воздуха в помещении на производительность труда (количество символов, набираемых на компьютере) [118]

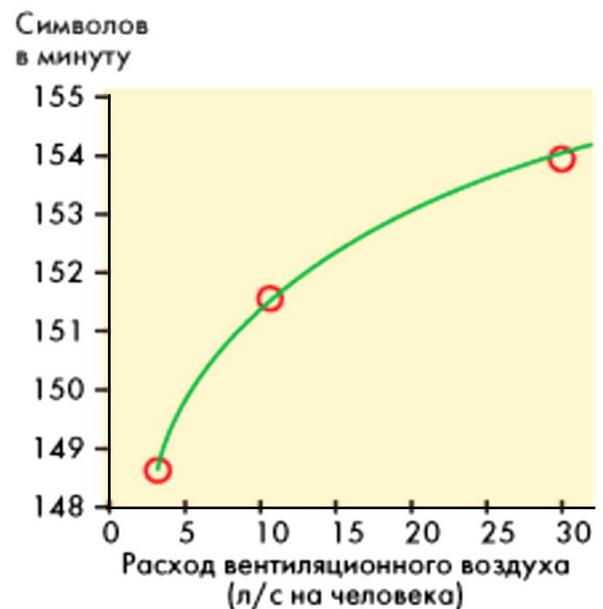


Рисунок 1.6 – Влияние расхода воздуха на производительность труда [118]

Требования по обеспечению воздуха необходимого качества в помещениях присутствуют в нормативных документах [27, 96, 100]. Однако при оценке комфортности микроклимата данный показатель учитывается не всегда, поскольку измерение содержания в воздухе помещения углекислого газа требует наличия

дополнительного измерительного оборудования. Например, ГОСТ 30494 «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях» [27] предполагает обеспечение требуемого качества воздуха необходимой величиной воздухообмена в помещениях.

Однако определение фактического воздухообмена помещений – процедура трудоемкая, требующая специального, громоздкого оборудования. Поэтому, как правило, в качестве фактического воздухообмена помещений принимают проектные значения.

Наиболее распространенными энергосберегающими мероприятиями для зданий непромышленного назначения в настоящее время являются «герметизирующие» мероприятия (замена оконных блоков на энергосберегающие стеклопакеты, утепление стен и дверей). Указанные решения при эксплуатации зданий изменяют воздухообмен, поэтому использование его проектных значений при оценке эффективности энергосберегающих мероприятий недопустимо.

Для исключения снижения качества воздуха при внедрении энергосберегающих мероприятий, необходимо определение фактического воздухообмена помещений объекта и выполнение прогноза изменения воздухообмена после реализации энергосберегающих мероприятий. Качество воздуха при этом выступает в качестве важного показателя при анализе уровня комфортности среды в помещении.

1.8 Средства измерения параметров микроклимата

Рассмотренные в разделе 1.6 диссертации методы оценки комфортности микроклимата предполагают либо сравнение отдельных параметров тепло-влажностного и воздушного режима помещения с установленными нормами, либо расчет интегрального показателя комфортности и оценку комфортности по заданной шкале. Однако все методы основаны на измерении параметров микроклимата, к которым относят температуру воздуха (T_e), относительную влажность (φ), подвижность воздуха (w_e), а в некоторых случаях результирующую температуру помещения ($T_{рез} = f(T_e; T_p)$), которая включает температуру воздуха (T_e) и ограж-

дающих поверхностей помещения (T_p), и локальную асимметрию результирующей температуры ($T_{л.а.}$), определенную как разность результирующих температур, измеренных шаровым термометром для двух противоположных направлений [27]. Качество воздуха к параметрам микроклимата в нормативных документах не относят, но при определении комфортности помещений также учитывают [27].

В настоящее время разработано и используется большое количество измерительных средств, которые используют для определения комфортности микроклимата [120]. Среди них можно выделить:

– стационарные измерительные устройства (системы и отдельные датчики) для измерения одной или нескольких характеристик микроклимата помещения. К данной группе, например, относятся: датчики температуры и относительной влажности воздуха комбинированные типа Н7012В1007, Н7012В1023, Н7015В1004, Н7015В1020; анализатор климата внутри помещений 1213, позволяющий измерить температуру, относительную влажность и подвижность воздуха. Устройства указанного типа применяются в отраслях техники, связанных с использованием систем отопления и кондиционирования воздуха в помещениях и на транспортных средствах.

– переносные (мобильные) измерительные устройства. Приборы указанного типа могут иметь один измерительный зонд и использоваться для измерения одной из характеристик микроклимата помещения (например, устройство измерения скорости потока воздуха WMA, анемометр-термометр цифровой ИСП-МГ4) или несколько измерительных зондов. Многофункциональные измерительные устройства, позволяющие определить несколько характеристик внутренней среды помещений имеют широкую область применения. Они могут быть использованы и в качестве стационарных измерительных устройств, и при комплексном обследовании внутренней среды объекта и его систем энергоснабжения. К многофункциональным измерительным устройствам относятся: метеометры (МСП-Метео, МЭС-200), измерители комбинированные компании testo, измерители и регистраторы параметров микроклимата (Метеоскоп-М, Метео-10, ЭкоТерма-1) и другие.

Сравнительная характеристика наиболее распространенных средств измерения, включенных в перечень утвержденных типов средств измерения [120], показывает, что большинство средств измерения, используемых для контроля параметров микроклимата в помещении, обладают ограниченным набором измеряемых параметров: температура воздуха, относительная влажность и подвижность воздуха. Качество воздушной среды (содержание углекислого газа/кислорода) позволяют оценить только 4 из 16 проанализированных измерительных приборов, предназначенных для контроля параметров микроклимата и включенных в перечень утвержденных типов средств измерения. Комплексное инструментальное обследование помещения, позволяющее зафиксировать основные параметры, оказывающие влияние на комфортность человека, позволяют организовать измерители комбинированные фирмы testo (Testo-400, Testo-435-1, Testo-435-2, Testo-435-3, Testo-435-4, Testo-445). Однако относительно высокая стоимость указанного оборудования [159] снижает его доступность.

Также были проанализированы средства измерения, включенные в перечень утвержденных типов средств измерения [120], для оценки фактического воздухообмена помещений. Единственным измерительным устройством указанного типа, включенным в перечень Росстандарта, является установка для определения воздухопроницаемости ограждающих конструкций Minneapolis BlowerDoor Modell 4.1, включающая разборную раму с воздухо непроницаемым полотнищем, осевой вентилятор набор диафрагм, блок управления вентилятором набор гибких импульсных трубок, прибор цифровой DG-700 для измерения перепада давлений и расхода воздуха.

1.9 Моделирование процессов тепломассообмена в помещении здания

При оценке эффектов от реализации энергосберегающих мероприятий в зданиях, предназначенных для нахождения людей, важной задачей является прогнозирование изменения комфортности микроклимата помещений.

Вопросами прогнозирования параметров микроклимата в целях проектирования энергетически эффективных систем отопления, вентиляции и кондиционирования помещений занимались В.М. Ильинский, В.Н. Богословский, Я.Д. Пекер, Ю.А. Табунщиков, Т.А. Дацюк, П.И. Дячек, Д.М. Денисихина и др. [9, 10, 35, 37, 39, 43, 81, 108].

До широкого распространения вычислительной техники наиболее распространенным методом прогнозирования состояния внутренней среды в помещении являлось физическое моделирование, осуществляемое в натуральных условиях и на геометрически подобных моделях. Основным достоинством физического моделирования является его достоверность. Однако на результат моделирования большое влияние оказывают помехи, в том числе, случайного характера, которые не позволяют выявить влияние конкретного параметра на микроклимат. Частично указанную проблему позволяет решить физическое моделирование в лабораторных условиях, которое позволяет систематически изучать влияние на объект определенного фактора. Однако выполнение исследований на реальных объектах или на физических стендах в лабораторных условиях требует значительных временных, трудовых и часто финансовых затрат.

В настоящее время самым распространенным методом прогнозирования состояния воздушной среды в помещении является математическое моделирование, позволяющее без материальных затрат на натурные эксперименты, изучить влияние различных факторов на физические процессы, протекающие при формировании микроклимата, а также исследовать объекты, находящиеся на стадии проектирования. Математические модели в зависимости от способа получения относят либо к функциональным, либо к детерминированным [4]. Функциональные модели получают при проведении экспериментальных исследований и представляются часто в виде регрессионных уравнений. Среди достоинств указанных моделей – простота. К недостаткам относится ограниченная область использования модели. Детерминированные модели в зависимости от вида используемых уравнений можно подразделить на дифференциальные, интегральные и интегро-дифференциальные.

Комбинацией функциональных и детерминированных моделей являются модели смешанного типа, в которых одним или несколькими уравнениями описываются наиболее существенные для исследуемого образца процессы, а все прочие факторы, оказывающие влияние на объект учитываются путем введения настроечных коэффициентов.

Моделирование процессов теплообмена, протекающих при формировании микроклимата помещений, сводится к решению нелинейной системы уравнений в частных производных, включающей уравнения переноса энергии, импульса, массы и примесей [65, 66, 69, 81, 108, 137, 158]. При наличии в помещении радиационного теплообмена систему уравнений дополняют уравнением для интенсивности радиационного излучения. Для получения единственного решения системы дифференциальных уравнений задают условия однозначности, которые включают в себя:

- геометрические размеры расчетной области и время процесса;
- физические свойства воздушной среды и ограждений;
- распределение внутренних тепловыделений (стоков);
- краевые условия (начальные и граничные условия) для каждого параметра микроклимата.

В полном виде указанная система уравнений сложна, поэтому при ее решении используют численные методы [7, 26, 38, 78, 93, 116].

В настоящее время различают два основных подхода к решению дифференциальных уравнений движения текучей среды и дифференциальных уравнений переноса [19, 32, 105, 116, 136]:

- прямое численное моделирование (Direct Numerical Simulation, DNS);
- моделирование с использованием осредненных по времени (Reynolds-averaged Navier–Stokes, RANS), по пространству (Large Eddy Simulation, LES) уравнений Навье-Стокса и их модификаций (Detached Eddy Simulation, DES).

DNS-моделирование является сложной задачей, требующей большого количества входных параметров и использования высокопроизводительных ЭВМ.

Метод LES используют при моделировании крупных вихрей и применим при решении задач в области метеорологии, аэроакустики, аэроупругости и д.р. Модели

RANS и DES получили распространение при решении широкого спектра инженерных задач. При этом RANS-метод позволяет использовать более крупную сетку, что экономит компьютерные ресурсы. DES-модель предполагает использование LES-метода в зоне отрывных течений и RANS – в области «гладкого» потока [36, 105].

Особой задачей при решении уравнений Навье-Стокса является задача моделирования турбулентности. В настоящее время разработано и используется большое количество моделей турбулентности, которые можно разделить на 4 большие группы в зависимости от числа дополнительных дифференциальных уравнений [22, 32, 36, 135, 136]:

- алгебраические модели (Прандтля, Ван Дриста, Себеси-Смита, Болдуина-Ломакса), в которых связь между турбулентной вязкостью и параметрами потока задают алгебраическими соотношениями;

- модели с одним дифференциальным уравнением (Спаларта и Аллмареса (SA, SARC, SACC), А.Н. Секундова, А.Н. Гуляева и В.Е. Козлова (v_t-92)), в которых записывают и решают одно дифференциальное уравнение, учитывающее влияние переноса турбулентной энергии (дифференциальное уравнение для турбулентной вязкости);

- модели с двумя дифференциальными уравнениями (k - ε модель Лаундера-Шармы, k - ω модели Уилкокса и Ментера, комбинация k - ε и k - ω моделей Ментера (SST)): записываются и решаются два дифференциальных уравнения (например, для кинетической энергии турбулентности (k) и диссипации энергии турбулентности (ε), масштаба турбулентности (l) или скорости диссипации энергии турбулентности (ω));

- модели с несколькими дифференциальными уравнениями (4-параметрическая модель $V2F$): записываются и решаются несколько дифференциальных уравнения (например, четыре уравнения для k , ε , масштаба скорости, эллиптическая релаксационная функция f).

При использовании наиболее распространенных двухпараметрических моделей турбулентности турбулентный кинематический коэффициент вязкости может быть представлен комплексом [16]:

$$v_t = c_v^\Phi k^{\frac{1+m}{2-n}} \cdot \Phi^{-\frac{1}{n}}, \quad (1.8)$$

где Φ – комплекс:

$$\Phi = c_\Phi \frac{k^m}{L^n}; \quad (1.9)$$

m, n – показатели степени;

L – характерный масштаб турбулентности, м

$c_v^\Phi, c_\Phi, c_v^L, c_v^\varepsilon, c_v^\omega$ – эмпирические константы.

Задавая различные значения показателей m и n , получают различные модели турбулентности. Наиболее распространенные модели приведены в таблице 1.4 [16].

Таблица 1.4 – Двухпараметрические модели турбулентности типа k - Φ

m	n	Параметр турбулентности Φ	v_t
0	-1	L	$v_t = c_v^L \sqrt{k} L$
1	-1	kL	$v_t = c_v^L \sqrt{k} L$
3/2	1	$\varepsilon = c_\varepsilon \frac{k^{3/2}}{L}$	$v_t = c_v^\varepsilon \frac{k^2}{\varepsilon}$
1/2	1	$\omega = c_\omega \frac{\sqrt{k}}{L}$	$v_t = c_v^\omega \frac{k}{\omega}$

Исследования в области моделирования турбулентных течений в помещении [93] показывают, что хорошие результаты показывают модели турбулентности «семейства» k - ε . При этом стандартная k - ε модель турбулентности позволяет рассчитывать течения с достаточной для инженерных расчетов точностью. При малых числах Рейнольдса, что характерно для пристеночных течений, лучшую согласованность расчетных и экспериментальных данных дает *RNG* (Renormalization Group) k - ε модель турбулентности [125]. При использовании этой модели турбулентности в пределах больших чисел Рейнольдса турбулентная вязкость (μ_t) определяется формулой Колмогорова-Прандтля [114], а при малых числах Рейнольдса используется дополнительное дифференциальное уравнение, позволяющее определить зависимость μ_t от k и ε [38, 93].

Решение системы дифференциальных уравнений с соответствующими условиями однозначности, моделирующей микроклимат в настоящее время возможно также численными методами, среди которых наибольшее распространение получили метод конечных разностей (МКР) и метод конечных элементов (МКЭ).

Основой метода конечных разностей является представление искомой непрерывной функции ее приближенной формой в виде значений в дискретных точках пространства в дискретные моменты времени [4, 7, 41, 81]. При этом дифференциального уравнения вместе с краевыми условиями заменяется системой алгебраических уравнений, связывающих значения функции в соседних узлах, которая называется разностной схемой решения задачи. Построение разностной схемы может быть выполнено двумя основными способами, отличающимися по типу преобразования исходного дифференциального уравнения: методом разностной аппроксимации (путем разложения исходной функции в ряд Тейлора в окрестностях каждой точки) и методом баланса (при составлении теплового баланса для каждой элементарной ячейки) [4].

В основе метода конечных элементов лежит метод аппроксимации непрерывной функции в пределах подобластей (конечных элементов), на который разбивается расчетная зона, множеством кусочно-непрерывных функций, удовлетворяющих граничным условиям. [41, 48, 60, 91]. Развитие высокопроизводительной компьютерной техники, разработка подробных математических моделей процессов теплообмена, прочности, химических реакций и др., а также накопление большого количества экспериментальных данных о протекании физических процессов способствовало реализации МКЭ в большом количестве программно-вычислительных комплексов (ANSYS, FlowVision, STAR-CCM, COMSOL Multiphysics и др.)

Большее распространение в инженерной практике получили нульмерные модели с сосредоточенными параметрами [108], отличительной особенностью которых является использование средних значений по объему исследуемых параметров. Использование моделей с сосредоточенными (точечными) параметрами

оправдано для помещений с достаточно равномерным распределением параметров в плане и по высоте. Для точечных моделей характерны допущения:

- одинаковая средняя по объему температура воздуха;
- одинаковая средняя температура поверхностей ограждений;
- одинаковая средняя концентрация вредных веществ (примесей) в объеме помещения;
- одинаковые и постоянные коэффициенты переноса (теплообмена, массообмена).

В основе сосредоточенных (точечных) моделей лежат системы алгебраических уравнений. Точечные модели, как правило, предназначены для ручного счета на калькуляторе.

При наличии в помещении поверхностей с высокой (или низкой температурой) при решении уравнений, описывающих теплообмен при формировании микроклимата, необходимо учитывать радиационные тепловые потоки. Согласно исследованиям [69], температура ограждающих поверхностей, значительно отличающаяся от температуры воздуха, оказывает влияние на ощущение «комфорта» человека в помещении.

Для учета радиационных потоков в помещении решают дифференциально-интегральное уравнение переноса лучистой энергии [40, 112]. Методы решения уравнения радиационного теплообмена (РТО) можно условно разделить на четыре группы [8, 12, 45, 63, 88, 94, 107, 113, 142, 151, 152, 155]. Первая группа включает в себя методы, в основе которых лежит представление уравнения РТО в виде дифференциального уравнения второго порядка – P_n -приближения метода сферических гармоник. Наиболее распространенной разновидностью метода является P_1 -приближение, которое можно получить также прямым интегрированием исходного интегрально-дифференциального уравнения переноса лучистой энергии по всему телесному углу (диффузионный метод) [126].

Вторая группа методов – методы Монте-Карло [94]. Указанный численный метод решения уравнения переноса лучистой энергии основан на моделировании случайных величин. Перенос энергии за счет излучения представляют в виде

столкновения фотонов или дискретных порций энергии с телом, приводящих к ее рассеиванию или поглощению (цепи Маркова).

К третьей группе методов решения интегрально-дифференциального уравнения переноса лучистой энергии относят зональные методы, в основе которых лежит разбиение излучающей среды и ограничивающей ее оболочки на поверхностные и объемные зоны [2, 8, 74, 88, 113]. При этом теплофизические параметры в пределах каждой зоны считаются постоянными.

К четвертой группе методов относят методы дискретных направлений, особенностью которых является не только пространственная, но и угловая дискретизация интегрально-дифференциального уравнения переноса лучистой энергии. При использовании методов дискретных направлений все пространство разбивают на ряд дискретных телесных углов с постоянной интенсивностью излучения. В данную группу методов включают потоковые методы, методы дискретных ординат (DOM) и методы конечных объемов (FVM) [142, 152].

В отдельную группу можно выделить метод дискретного переноса, разработанный Шахом и Локвудом. Метод объединяет в себе потоковые методы и методы Монте-Карло [152].

В наиболее распространенных программно-вычислительных комплексах при решении уравнений движения и теплообмена в текучих средах для переноса лучистой энергии чаще всего [63] используют методы P_1 -приближения, метод конечных объемов (FVM) и метод дискретных ординат (DOM).

Заметим, что метод конечных объемов (FVM) требует большой объем вычислительных ресурсов, по сравнению с методом дискретных ординат (DOM), но, в отличие от метода P_1 -приближения не имеет ограничения по оптическим свойствам среды.

Метод P_1 -приближения применим при большой оптической толщине среды и сложной геометрии, а также требует, по сравнению с методами FVM и DOM минимальный объем ресурсов вычислительной техники [63, 151].

1.10 Программно-вычислительные комплексы для расчета движения и теплообмена в текучих средах

В настоящее время с развитием вычислительной техники широкое распространение получили методы моделирования процессов тепломассообмена при помощи программно-вычислительных комплексов (ПВК).

Первые программные средства для решения задач вычислительной гидрогазодинамики базировались на исследованиях Группы Вычислительной Гидродинамики Т-3, работающей в Национальной Лаборатории Лос-Аламоса (США) с 1958 г., и исследовательских проектах Д. Б. Сполдинга (Имперский колледж Лондона) [160]. В конце 1960-х профессор Д.Б. Сполдинг основал консалтинговую компанию CHAM Ltd. (Concentration, Heat and Momentum), сотрудниками которой была разработана программа PHOENICS для решения задач вычислительной гидрогазодинамики. В 1981 г. PHOENICS выпустили как коммерческий продукт. Этот год считают годом рождения индустрии коммерческих ПВК для решения задач вычислительной гидро- и газодинамики. В 1982 г. Fluid Dynamics International (США) выпустили пакет FIDAP, основанный на методе конечных элементов, а в 1983 г. Create Inc. (США) разработали пакет на основе метода конечных объемов Fluent.

Для решения задач вычислительной гидрогазодинамики в настоящее время широко используются программно-вычислительные комплексы: CFX, FLUENT, FlowVision, STAR-CCM, FLOW-3D, GasDynamicsTool, COMSOL Multiphysics и ряд других. Краткая характеристика наиболее распространенных ПВК, основанная на обзоре руководств и сайтов разработчиков, приведена в таблице 1.5.

Анализ наиболее распространенных программно-вычислительных комплексов, используемых для моделирования процессов аэро- и гидродинамики, показал, что ANSYS Fluent обладает необходимым набором параметров для решения задач тепломассообмена в помещениях в целях прогнозирования параметров микроклимата. ПВК ANSYS Fluent позволяет производить расчеты для сжимаемых газов, учитывая наличие водяного пара и прочих примесей, а также обладает большим количеством встроенных моделей теплопереноса и турбулентности, а также

Таблица 1.5 – Особенности некоторых ПБК для решения задач в области вычислительной гидрогазодинамики [3, 25, 44, 77, 143, 144, 145]

Характеристика	ANSYS CFX	ANSYS Fluent	FlowVision	STAR-CCM+	FLOW-3D	GasDynamicsTool	COMSOL Multiphysics (ранее FEMlab)
Метод расчета	МКЭ	МКЭ	МКЭ (МКО)	МКЭ (МКО)	МКЭ	МКЭ	МКЭ
Возможность расчета стационарных и нестационарных процессов	да	да	да	да	да	да	да
Возможность решения твух- и трехмерных задач	да	да	да	да	да	да	да
Наличие базы данных по свойствам веществ	да	да	да	да	да	да	да
Возможность задавать самостоятельно характеристики вещества	да	да	да	да	нет	да	да
Изменяемые во времени граничные условия	да	да	да	да	нет	да	да
Расчет теплообмена	естественная конвекция, теплопроводность лучистый теплоперенос (с учетом и без оптических свойств среды), сопряженный теплообмен	естественная конвекция, теплопроводность лучистый теплоперенос (с учетом и без оптических свойств среды), сопряженный теплообмен	естественная и вынужденная конвекция, теплопроводность лучистый теплоперенос, сопряженный теплообмен	естественная и вынужденная конвекция, теплопроводность лучистый теплоперенос, сопряженный теплообмен; моделирование теплового комфорта (TCM)	естественная и вынужденная конвекция, теплопроводность лучистый теплоперенос, сопряженный теплообмен	естественная и вынужденная конвекция, теплопроводность	естественная и вынужденная конвекция, теплопроводность; сопряженный теплообмен

Продолжение таблицы 1.5

Учет турбулентных свойств среды	да (турбулентность изотропная, RSM, LES, SAS, DES, моделирование ламинарно-турбулентного перехода)	да (турбулентность изотропная, RSM, LES, SAS, DES, моделирование ламинарно-турбулентного перехода)	да (модели турбулентности RSM, LES, SAS, моделирование ламинарно-турбулентного перехода)	да (модели турбулентности RANS, LES, DES, моделирование ламинарно-турбулентного перехода)	да (модели турбулентности RNG, k-ε, k-ω, LES)	нет	да (модели турбулентности L-VEL, yPlus, SAS, k-ε, k-ω, низкорейнольдсовая k-ε и SST)
Учет многофазности	да	да	да	да	да (возможность расчета двухфазных и двухкомпонентных потоков)	да	да
Высокопроизводительные расчеты:							
поддержка многоядерности	да	да	да	да	да	да	да
поддержка графических процессоров	да	нет	да	да	да	да	да
Автоматическая генерация расчетной сетки	да (в том числе с возможностью динамической адаптации в процессе расчета)	нет	да	да	да	да	да
Возможность адаптации расчетной сетки	да (в том числе в процессе расчета)	да (в том числе в процессе расчета)	да (динамическая локальная адаптация)	да	нет	нет	да

Продолжение таблицы 1.5

Возможность импорта геометрических моделей	да	да	да	да	да	частично (частично совместим с форматом STEP)	да
Подробная и понятная документация по ПВК	да	да	да	по официальному запросу	да	по официальному запросу	да

встроенным механизмом адаптации расчетной сетки, позволяющим повысить точность вычислений.

1.11 Выводы по главе 1

1. Здания непромышленного назначения обладают значительным потенциалом по энергосбережению, который реализуют путем внедрения энергосберегающих мероприятий. 2. При оценке комфортности микроклимата необходимо учитывать качество воздушной среды, которое для зданий с естественной вентиляцией определяется фактическим воздухообменом.

3. Задачи энергосбережения и обеспечения комфортного микроклимата в зданиях непромышленного назначения должны решаться совместно, так как внедрение типовых энергосберегающих мероприятий в зданиях непромышленного назначения может приводить к снижению комфортности микроклимата, что отрицательно сказывается на самочувствии и работоспособности человека, а также на эксплуатационных характеристиках объекта.

4. В настоящее время отсутствует способ оценки комфортности микроклимата для зданий непромышленного назначения, позволяющий учесть как параметры тепловлажностного режима помещений, так и качество воздушной среды.

5. Средства измерения параметров внутренней среды помещения либо обладают ограниченным диапазоном контролируемых параметров, и поэтому не позволяют в полной мере оценить комфортность микроклимата, либо имеют высокую стоимость.

Измерительные приборы для определения фактического воздухообмена помещений представлены в настоящее время в перечне утвержденных типов средств измерения РФ единственной измерительной установкой.

6. При оценке эффективности энергосберегающих мероприятий актуальной задачей является определение параметров внутренней среды помещения после внедрения энергосберегающего проекта в целях оценки изменения комфортности микроклимата и необходимости реализации сопутствующих мероприятий.

7. Для решения задачи прогнозирования значений параметров микроклимата в помещении после процедуры энергосбережения может быть использован современный метод математического моделирования.

На основе приведенного обзора литературы по теме исследования можно сформулировать следующие задачи исследования.

1. Экспериментально получить данные о влиянии на комфортность микроклимата параметров внутренней среды помещений и факторов, связанных с внедрением энергосберегающих мероприятий.

2. Разработать метод оценки комфортности микроклимата в зданиях, предназначенных для длительного пребывания людей, учитывающий как характеристики тепловлажностного режима помещения, так и качество воздушной среды, а также основные вредности, характерные для помещений непромышленного назначения.

3. Разработать математическую модель процессов теплообмена в помещении здания непромышленного назначения в целях прогнозирования параметров микроклимата после внедрения энергосберегающих мероприятий.

4. Разработать измерительный комплекс для экспериментальной оценки комфортности микроклимата в помещениях зданий непромышленного назначения.

5. Разработать метод оценки эффективности энергосберегающих мероприятий с учетом комфортности микроклимата и показать повышение эффективности энергосбережения для непромышленных зданий при использовании разработанного метода.

ГЛАВА 2. МЕТОД ОЦЕНКИ КОМФОРТНОСТИ МИКРОКЛИМАТА

Обзор литературных источников [15, 49, 76, 92, 108 – 110, 118], посвященных проблемам энергосбережения и микроклимата в жилых, общественных и административных зданиях, показал:

1) эффективность мероприятий, целью которых является энергосбережение в системах энергоснабжения зданий, должна быть оценена не только с точки зрения экономических показателей, но и с точки зрения поддержания комфортного микроклимата, поэтому комфортные для человека параметры внутренней среды помещения выступают в качестве целевой функции и одновременно являются ограничением при реализации энергосберегающих решений;

2) целью функционирования систем энергоснабжения зданий непроизводственного назначения (отопления, кондиционирования, электроснабжения (при электрическом отоплении)) является обеспечение комфортных для человека параметров внутренней среды, поэтому необходимо проектировать и внедрять энергосберегающие мероприятия в системах энергоснабжения объектов с учетом комфортности микроклимата.

Таким образом, энергосбережение и обеспечение комфортного микроклимата в помещениях здания являются взаимосвязанными задачами, решение которых должно выполняться совместно.

В диссертации разработан новый комплексный метод оценки эффективности энергосберегающих мероприятий, который основан на расчете критерия, характеризующего комфортность помещений до и после внедрения энергосберегающих решений.

2.1 Расчет уровня комфортности микроклимата

В главе 1 показано, что существующие способы оценки комфортности микроклимата имеют ограниченную область применения [15, 70, 146, 147, 149, 154, 156], потому что большинство из них применимы только для помещений производствен-

ных зданий и учитывают ограниченное число параметров микроклимата. Поэтому в диссертационной работе была поставлена и решена задача разработки нового способа определения комфортности микроклимата в помещениях объектов непромышленного назначения, к которым были отнесены жилые, общественные и административные здания. В качестве критерия комфортности микроклимата предложено использовать комплекс – уровень комфортности микроклимата, численно характеризующий восприятие человеком основных параметров микроклимата и некоторых вредностей, характерных для зданий непромышленного назначения.

Разработка нового метода оценки комфортности микроклимата базируется на исследованиях отечественных и зарубежных ученых [50, 51, 70].

Метод оценки комфортности микроклимата в помещениях зданий непромышленного назначения основан на определении коэффициента комфорта теплового состояния человека и коэффициента качества воздушной среды с введением поправок на основные вредности, характерные для жилых, общественных и административных зданий: асимметрию теплового излучения, радиационное охлаждение и наличие в воздухе иных вредных примесей (пыли, токсичных газов). Предложено уровень комфортности микроклимата рассчитывать по формуле [15]

$$U_{ком} = \beta(K_{TK} \cdot \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 + K_{КС} \cdot \varepsilon_3), \quad (2.1)$$

где K_{TK} – коэффициент комфортности теплового состояния человека, который изменяется от минус 1 до плюс 1 (-1 ÷ +1). При этом $K_{TK} = 0$ соответствует абсолютно комфортному тепловому состоянию человека; $K_{TK} = -1$ – полное отсутствие комфорта при недостатке теплоты; $K_{TK} = 1$ – полное отсутствие комфорта при избытке теплоты;

ε_1 – поправка, учитывающая влияние на комфортность микроклимата радиационного охлаждения;

ε_2 – поправка, учитывающая влияние на комфортность микроклимата асимметрии теплового излучения;

$K_{КС}$ – коэффициент качества воздушной среды, учитывающий соответствие качества воздуха нормам, установленным ГОСТ 30494-2011 «Здания жилые и

общественные. Параметры микроклимата в помещениях» [27]. Коэффициент имеет знак «–» в случае недостатка теплоты ($K_{TK} < 0$) и знак «+» при избытке теплоты ($K_{TK} \geq 0$);

ε_3 – поправка на дополнительные вредности, снижающие качество воздушной среды (пыль и прочие примеси);

β – коэффициент, учитывающий тип зданий (для зданий непромышленного назначения $\beta = 1$, а для промышленных зданий $\beta > 1$).

Определение уровня комфортности включает четыре этапа.

На *первом* этапе устанавливают характеристики работ, выполняемых в обследуемом помещении, по данным медико-биологических исследований:

- преимущественный тип работ;
- метаболическую теплоту, отнесенную к 1 м^2 поверхности тела человека, q_{MT} , Вт/м²;

- коэффициент полезного действия механической работы η ;

- относительную скорость движения человека в неподвижном воздухе w_0 , м/с.

По справочным данным [57, 69] находят термическое сопротивление R_0 одежды людей, находящихся в помещении.

На *втором* этапе определения уровня комфортности микроклимата измеряют температуру воздуха $T_{\text{в}}$, относительную влажность воздуха φ , температуру поверхности одежды T_0 , подвижность воздуха w , температуру ограждающих поверхностей $T_{w,i}$, концентрацию углекислого газа (CO_2) в воздухе обследуемого помещения $C_{\text{в}}$ и в наружном воздухе C_{oc} . Затем выбирают максимальную $T_{w,\text{max}}$ и минимальную $T_{w,\text{min}}$ температуры ограждающих поверхностей помещения.

На *третьем* этапе расчета уровня комфортности рассчитывают коэффициент теплового комфорта человека

$$K_{TK} = \frac{q_e - q_n}{q_e}, \quad (2.2)$$

где q_e – теплота, генерируемая человеком при данном типе работ, отнесенная к площади поверхности тела человека, Вт/м²;

q_n – фактические потери теплоты с поверхности тела человека при заданных параметрах микроклимата, Вт/м².

Если количество теплоты, производимое телом человека равно количеству теплоты, удаляемому в окружающую среду ($q_z = q_n; K_{TK} = 0, U_{ком} = 0$), то система терморегуляции человека не испытывает нагрузок и человек ощущает чувство комфорта. Если человеческое тело вырабатывает энергии больше, чем удаляется в окружающую среду ($q_z > q_n; K_{TK} > 0, U_{ком} > 0$), то человек ощущает некомфортный избыток теплоты и ему жарко. Если человек передает в окружающую среду теплоты больше, чем необходимо для поддержания теплового баланса ($q_n > q_z; K_{TK} < 0, U_{ком} < 0$), то его тело охлаждается и ему холодно.

Значение генерируемого человеком теплового потока рассчитывают, составляя уравнение теплового баланса человека в помещении, по методике, предложенной в [4, 5, 69].

Тепловой поток, уходящий с 1 м² поверхности тела человека, рассчитывают по формуле, Вт/м²

$$q_z = q_{ТП} - q_{ДП} - q_{ИП} - q_{ДС} - q_{ДЯ}, \quad (2.3)$$

где $q_{ТП}$ – внутренняя теплопродукция тела человека;

$q_{ДП}$ – тепловые потери через кожу человека за счет диффузии паров;

$q_{ИП}$ – потери теплоты с поверхности кожи при испарении влаги;

$q_{ДС}$ – скрытые потери теплоты при дыхании человека;

$q_{ДЯ}$ – явные потери теплоты при дыхании человека.

Внутреннюю теплопродукцию тела человека рассчитывают по формуле [69]

$$q_{ТП} = q_{МТ}(1 - \eta), \quad (2.4)$$

где $q_{МТ}$ – метаболическая теплота (энергия процесса окисления, происходящего в теле человека), отнесенная к единице поверхности тела человека, Вт/м²;

η – коэффициент полезного действия механической работы.

Потери теплоты через кожу человека за счет диффузии паров $q_{ДП}$ составляют [69], Вт/м²:

$$q_{ДП} = 0,41(1,92T_k - 25,3 - p_s), \quad (2.5)$$

где T_k – температура кожи человека; рассчитывается по формуле, $^{\circ}\text{C}$:

$$T_k = 35,7 - 0,032q_{MT}(1 - \eta), \quad (2.6)$$

p_v – парциальное давление водяных паров во влажном воздухе, мм рт. ст. В интервале температур от 10 до 30 $^{\circ}\text{C}$ зависимость парциального давления водяных паров от температуры аппроксимируется (с величиной достоверности аппроксимации $R^2=0.9998$) полиномом второго порядка вида:

$$p_v = 0,01\varphi(0,305T_v^2 - 0,1027T_v + 7,3596). \quad (2.7)$$

Количество теплоты, затрачиваемое на испарение жидкости с поверхности тела человека, рассчитывают по выражению [69], $\text{Вт}/\text{м}^2$

$$q_{ИП} = 0,49(q_{MT}(1 - \eta) - 50). \quad (2.8)$$

Скрытую и явную теплоту, выделяемую в процессе дыхания, рассчитывают по следующим эмпирическим формулам [69], $\text{Вт}/\text{м}^2$:

$$q_{ДС} = 0,0027q_{MT}(44 - p_v); \quad (2.9)$$

$$q_{ДЯ} = 0,0014q_{MT}(34 - T_v). \quad (2.10)$$

Тепловой поток, фактически удаляемый с поверхности тела человека, равен, $\text{Вт}/\text{м}^2$

$$q_{\phi} = q_L + q_K, \quad (2.11)$$

где q_L – потери теплоты излучением с поверхности одежды и непокрытой одеждой поверхности тела человека, $\text{Вт}/\text{м}^2$;

q_K – потери теплоты конвекцией, $\text{Вт}/\text{м}^2$.

Лучистый тепловой поток, уходящий с поверхности тела человека, рассчитывают по формуле, $\text{Вт}/\text{м}^2$

$$q_L = \varepsilon\sigma\varphi_{a-w} \left[(T_o + 273)^4 - (T_{w,p} + 273)^4 \right], \quad (2.12)$$

где ε – интегральная степень черноты излучающей поверхности тела человека. В соответствии с данными [69] принимают $\varepsilon = 0,8$;

σ – постоянная Стефана-Больцмана, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$;

ϕ_{q-w} – угловой коэффициент излучения с поверхности тела человека в окружающую среду;

$T_{w,p}$ – средняя радиационная температура помещения, которую принимают на 2°C ниже температуры воздуха в помещении.

Конвективный тепловой поток, уходящий с поверхности тела человека, по экспериментальным данным составляет величину, $\text{Вт}/\text{м}^2$:

– в неподвижном воздухе

$$q_K = 2,4(T_o - T_g)^{1,25}; \quad (2.13)$$

– при вынужденной конвекции и $0,1 < w < 2,6$ м/с

$$q_K = 12,1\sqrt{w + w_0}(T_o - T_g). \quad (2.14)$$

Зная тепловой поток, генерируемый человеком при данном типе работ (q_z), и фактические потери теплоты с поверхности его тела при заданных параметрах микроклимата (q_n), рассчитывают коэффициент комфорта теплового состояния человека по формуле (2.2).

На **четвертом** этапе расчета определяют поправки, учитывающие основные вредности зданий непроизводственного назначения, снижающие комфортность микроклимата [42, 69, 103, 130].

Для учета влияния радиационного охлаждения на уровень комфортности в расчет вводят поправку ε_l . При соблюдении в помещении оптимальных температуры, влажности и подвижности воздуха, установленных ГОСТ-30494 [27], ощущение комфортности не достигается при низкой температуре ограждающих поверхностей и, как следствие, дополнительных тепловых потерь излучением с поверхности тела человека.

Для определения поправки ε_l рассчитывают лучистый тепловой поток, уходящий с поверхности тела человека при радиационном теплообмене с самой холодной поверхностью помещения по формуле:

$$q_{ЛТ} = \varepsilon\sigma\phi_{q-w,\min} \left[(T_o + 273)^4 - (T_{p,\min} + 273)^4 \right], \quad (2.15)$$

где $\varphi_{ч-w,min}$ – угловой коэффициент излучения с поверхности тела человека на наиболее холодную ограждающую поверхность.

Зная лучистый тепловой поток $q_{ЛТ}$, определяем поправку ε_1 по формуле

$$\varepsilon_1 = 1 + \frac{q_{ЛТ}}{q_2}. \quad (2.16)$$

Поправка ε_2 , учитывающая снижение комфортности микроклимата помещений при одновременном наличии и нагретых и охлажденных поверхностей, рассчитывается на основе аппроксимации полиномом третьего порядка (с величиной достоверности аппроксимации $R^2=0,9951$) экспериментальных данных Фангера, Банхиди, Олесена и Лингкильде (рис. 2.1):

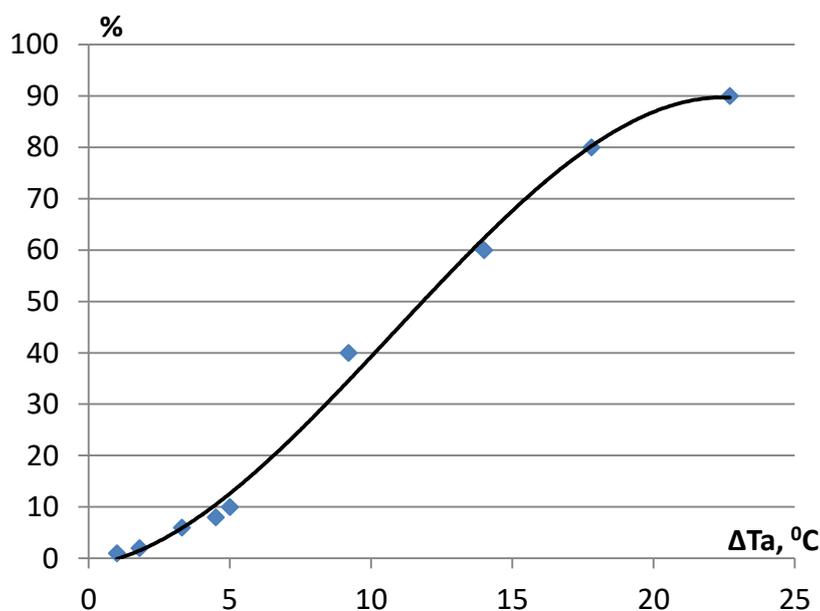


Рисунок 2.1. Доли людей с чувством дискомфорта от радиационной асимметрии (по данным Фангера, Банхиди, Олесена и Лингкильде) [69]

$$\varepsilon_2 = 1 + 0,01(-0,0145\Delta T_a^3 + 0,4701\Delta T_a^2 + 0,8108\Delta T_a - 1,4049), \quad (2.17)$$

где ΔT_a – разность температур наиболее теплой и наиболее холодной поверхностей помещения, °C:

$$\Delta T_a = T_{w,max} - T_{w,min}. \quad (2.18)$$

Учет качества воздуха, которое влияет на самочувствие и работоспособность человека [42, 108, 110, 118], выполняют при помощи коэффициента качества воздушной среды $K_{КС}$, который рассчитывают по значению избыточной концентрации CO_2 в помещении, а также поправки ε_3 на наличие в воздухе дополнительно снижающих его качество веществ (газов, пыли, биологических организмов и т.д.). При отсутствии дополнительных примесей $\varepsilon_3 = 1$.

Избыточную концентрацию углекислого газа рассчитывают по формуле:

$$\Delta C = C_e - C_{oc}. \quad (2.19)$$

Показатель качества воздушной среды $K_{КС}$ равен:

– при $\Delta C \leq 400$ ppm

$$K_{КС} = 0; \quad (2.20)$$

– при $\Delta C > 400$ ppm

$$K_{КС} = 0,000625\Delta C - 0,25, \quad (2.21)$$

где $\Delta C = 400$ ppm является верхним пределом концентрации углекислого газа для признания качества воздуха высоким при соблюдении оптимальных условий по ГОСТ–30494 [27].

При отсутствии измерительного оборудования для определения избыточной концентрации углекислого газа, можно для оценки ΔC использовать величину фактического воздухообмена помещения. Подробно методика определения фактического воздухообмена помещения здания описана в разделе 3.3. При этом расчетное значение избыточной концентрации углекислого газа составит, ppm:

$$\Delta C = \frac{N h_{yd}}{n_{\phi} V} 10^3, \quad (2.22)$$

где N – среднее количество человек, присутствующих в помещении;

h_{yd} – количество углекислого газа, выдыхаемого одним человеком в час, л/ч. В соответствии с [103, 130, 139] $h_{yd} = 19 \div 23$ л/ч;

n_{ϕ} – фактическая величина воздухообмена помещения, ч⁻¹;

V – объем помещения, м³.

Рассчитав коэффициент теплового комфорта K_{TK} и коэффициент качества воздушной среды $K_{КС}$, а также поправки ε_1 , ε_2 и ε_3 на радиационное охлаждение, асимметрию теплового излучения и наличие дополнительных примесей, находят интегральный показатель микроклимата – уровень комфортности микроклимата по формуле (2.1).

2.2 Теплоощущение человека в зависимости от параметров внутренней среды помещения

Для анализа влияния на ощущение комфорта различных параметров микроклимата была проведена серия экспериментов в помещениях ИГЭУ, предназначенных для учебных занятий студентов. В ходе эксперимента при помощи метеометра МЭС-200А были измерены температура, относительная влажность, подвижность воздуха и атмосферное давление, а также параметры наружной среды: температура, относительная влажность, подвижность наружного воздуха, атмосферное давление, общие характеристики погоды (наличие облачности, осадков). Для экспериментов были привлечены 103 студента второго курса ИГЭУ в возрасте 18 – 21 год.

Находящиеся в учебных аудиториях студенты определяли по своим субъективным ощущениям, комфортность параметров микроклимата в помещении по шкале теплоощущений Кренко [69]:

холодно	-3
прохладно	-2
приятная прохлада	-1
приятно	0
приятное тепло	+1
тепло	+2
очень тепло (жарко)	+3

Во время эксперимента также фиксировалось местоположение людей, находящихся в помещении, относительно окон, дверей, отопительных приборов, их пол и возраст.

Данные экспериментов по установлению соответствия теплового комфорта человека по шкале Кренко [69] параметрам микроклимата в помещении приведены в таблице 2.1. Эксперименты проводились в холодный период года (февраль – апрель 2016 г.).

Таблица 2.1 – Оценка студентами теплоощущения в зависимости от параметров микроклимата

№	Параметры воздуха в помещении			Теплоощущение человека в помещении
	Температура (Т), °С	Относительная влажность (φ), %	Подвижность (w), м/с	
1	26,6	43	0,01	+2
2	24,8	27	0,12	-1
3	22,7	27	0,01	-2
4	22,8	27	0	-2
5	23	23	0,16	-2
6	23,3	23	0	-2
7	25,3	28	0,11	0
8	28,5	43	0,15	3

Анализ результатов экспериментов показал:

1) температура воздуха в помещениях экспериментальных учебных аудиторий превышает оптимальные значения (19-21 °С), установленные ГОСТ 30494-2011 [27] для помещений 2 категории (помещения, в которых люди заняты умственным трудом, учебой);

2) температура воздуха в помещении в ряде экспериментов (№ 2, № 6 таб. 2.6) превышает допустимые значения (18-23 °С), установленные ГОСТ 30494-2011 [27] для данного вида помещений, но, несмотря на это, в помещении испытуемыми ощущается «приятная прохлада», либо «прохлада»;

3) подвижность воздуха удовлетворяет оптимальным условиям по ГОСТ 30494-2011 [27] ($\leq 0,2$ м/с);

4) относительная влажность воздуха в 80% экспериментов ниже оптимальных значений для помещений 2 категории (30-45 %), но находится в интервале допустимых значений ($\leq 60\%$).

Таким образом, оптимальные параметры микроклимата, установленные ГОСТ 30494-2011 [27], не соответствуют субъективному комфортному теплоощущению человека в помещении учебной аудитории.

Ни рисунке 2.2 показаны результаты одного из экспериментов по определению соответствия между теплоощущением человека по шкале Кренко [69] и параметрами микроклимата в помещении.

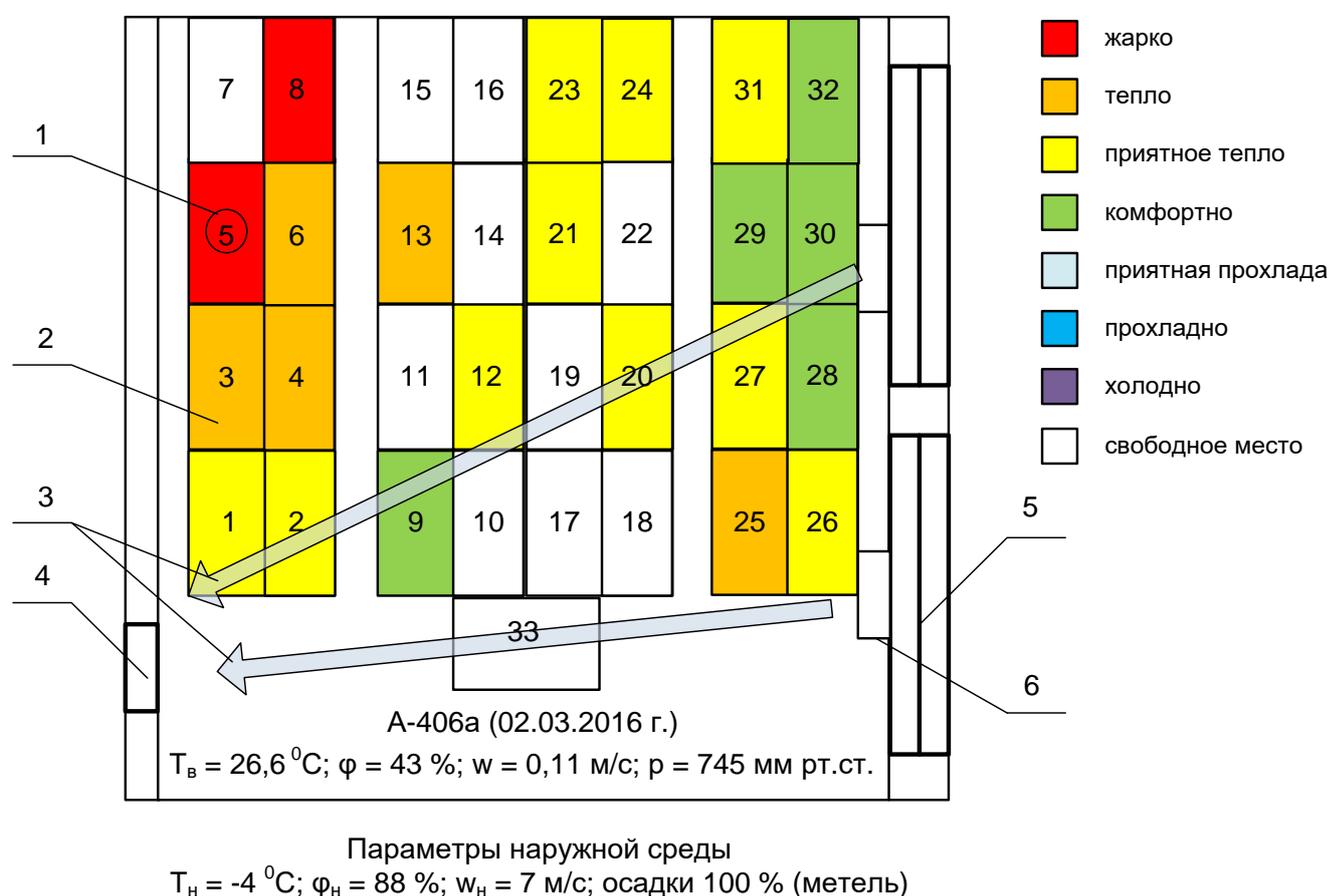


Рисунок 2.2 – Теплоощущения студентов в помещении учебной аудитории:

1 – номер места человека в аудитории; 2 – местоположение человека в аудитории; 3 – основное направление движения инфильтрационного воздуха; 4 – дверь; 5 – окно; 6 – радиатор системы отопления

Анализ результатов эксперимента показал, что во время проведения измерений в помещении температура воздуха составляла $26,6^{\circ}\text{C}$, что на $5,6^{\circ}\text{C}$ больше оптимальных значений и на $3,6^{\circ}\text{C}$ больше допустимых значений для данного типа помещений в холодный период года. При этом большая часть студентов (17 чел. из 22 или 77%) ощущает избыток теплоты: 45% комфортность микроклимата в помещении описали как «приятное тепло»; свое теплоощущение как «жарко» описали 2 человека из 22 присутствовавших (9%), причем их расположение в обследованном помещении позволяет предположить наличие застойной зоны воздуха в области мест № 5 и № 8 (рис. 2.2). Однако студенты находящиеся вблизи окон (источников инфильтрации и радиационного охлаждения) на местах №№ 28, 29, 30 и 32, а также расположенные в зоне действия потоков инфильтрационного воздуха (место № 9) ощущают «комфорт» (23% из присутствующих).

Эксперименты в учебных аудиториях показали, что ощущение теплового комфорта зависит от положения человека относительно источников радиационного нагрева (отопительных приборов) или охлаждения (окна, участки наружных стен помещений с низкой температурой).

2.3 Определение характеристик внутренней среды помещений

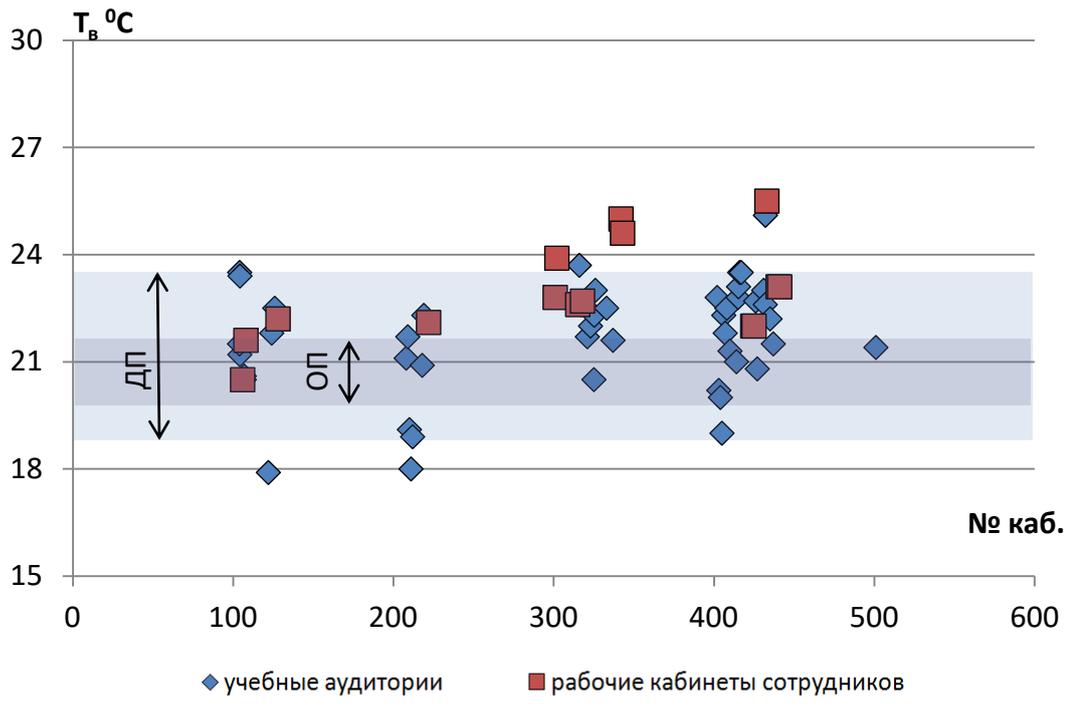
В рамках экспериментального исследования микроклимата помещений зданий непромышленного назначения был выполнен анализ соответствия параметров внутренней среды значениям, рекомендуемым нормативными документами, в частности, ГОСТ 30494 «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях».

При проведении эксперимента метеометром МЭС-200А проводились измерения средней температуры, подвижности и влажности воздуха в помещениях учебных аудиторий и рабочих кабинетах ВУЗа (ИГЭУ). Основные характеристики измерительного оборудования приведены в таблице 2.2. При обследовании помещений фиксировалась возможность регулирования параметров микроклимата в помещениях путем установки дополнительных средств и оборудования для изме-

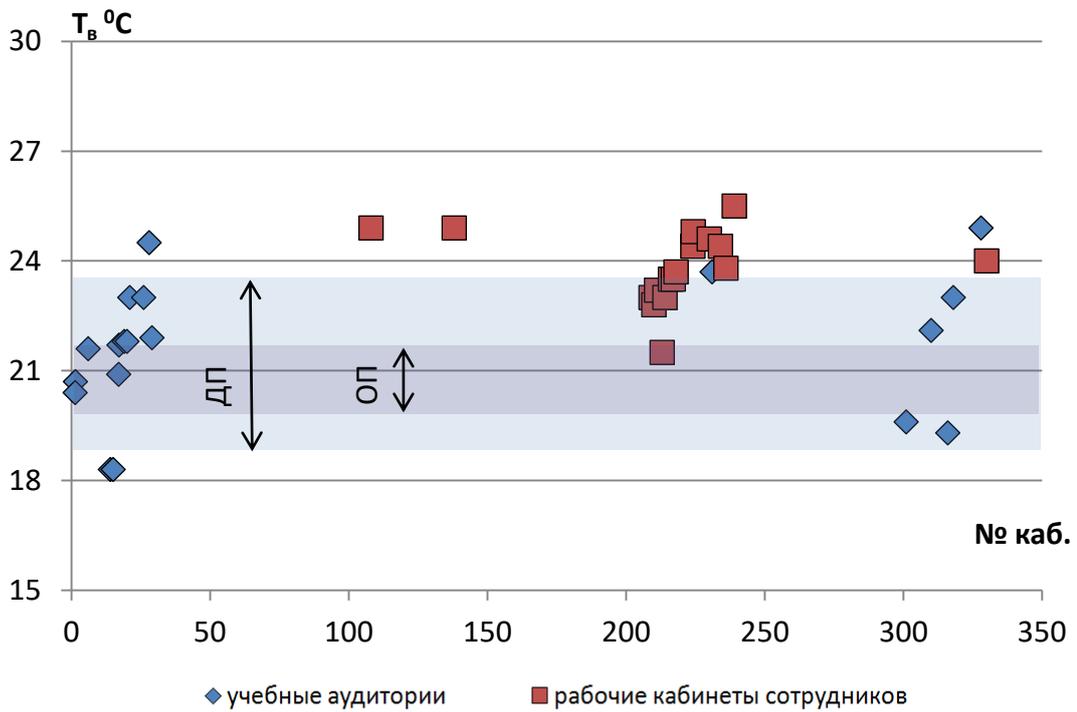
нения параметров воздушной среды (экранов перед отопительными приборами, сплит-систем, электрических обогревателей и т.п.). Результаты измерений приведены в Приложении А. Результаты обработки экспериментальных данных показаны на рисунках 2.3 – 2.5.

Таблица 2.2 – Основные характеристики измерительного оборудования

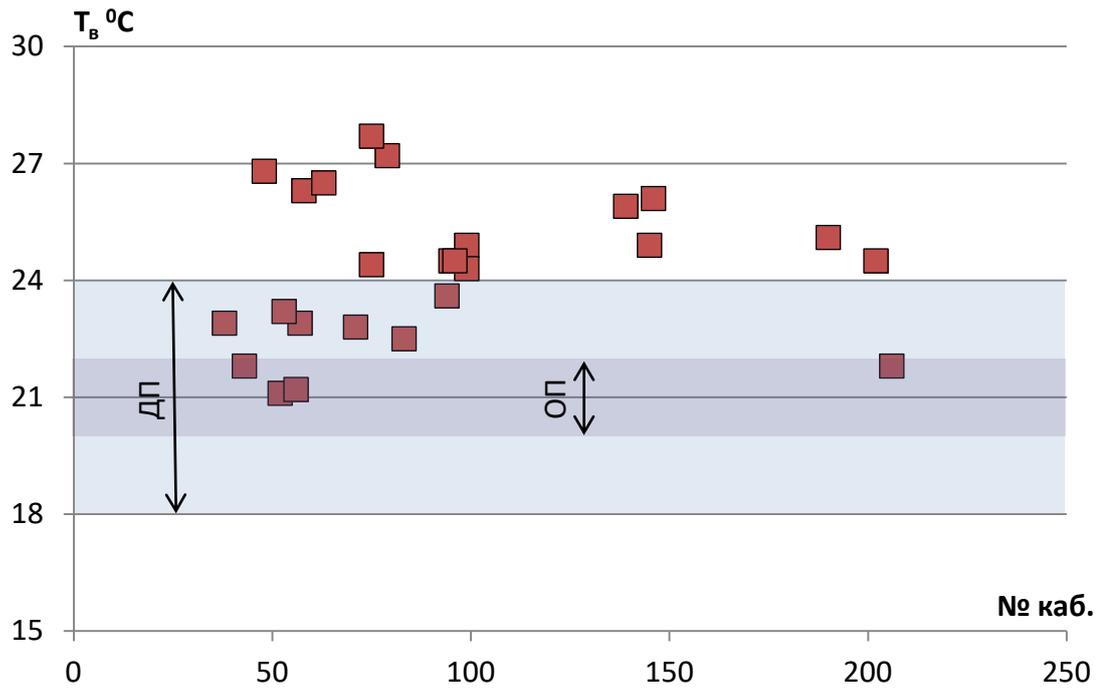
№ п/п	Наименование	Измеряемые величины	Пределы измерений	Погрешность измерений
2	МЭС-200А	атмосферное давление	80 ÷ 110 кПа	± 0,3 кПа (± 2,3 мм.рт.ст.) при температуре от 0 до 60 °С ± 1,0 кПа (± 7,6 мм.рт.ст.) при температуре от минус 20 до 0 °С
		относительная влажность воздуха	0 ÷ 98 %	± 3,0 % при температуре (25 ± 5 °С)
		температура воздуха	минус 40 ÷ 85 °С	± 0,2 °С в диапазоне от минус 10 до 50 °С ± 0,5 °С в диапазоне от минус 40 до минус 10 °С и от 50 до 85 °С
		скорость воздушного потока	0 ÷ 20 м/с	не нормируется в диапазоне от 0 до 0,1 м/с ± (0,05 + 0,05V _x) м/с в диапазоне от 0,1 до 0,5 м/с ± (0,1 + 0,05V _x) м/с в диапазоне от 0,5 до 20 м/с, где V _x – измеренное значение скорости, м/с



а)

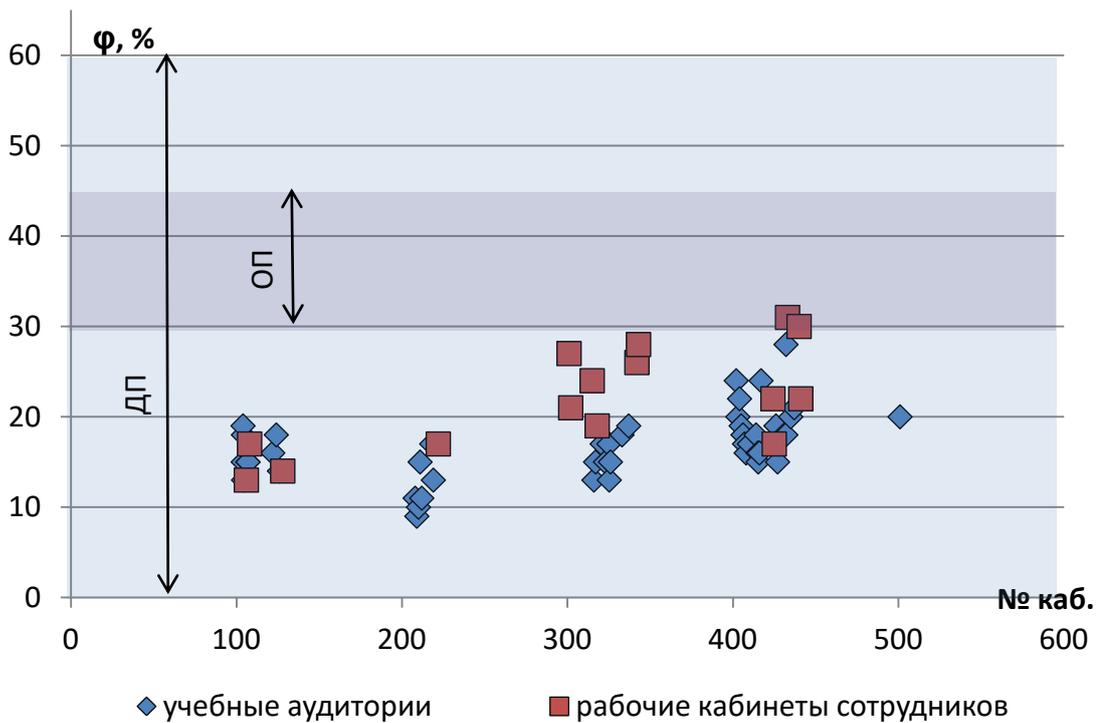


б)

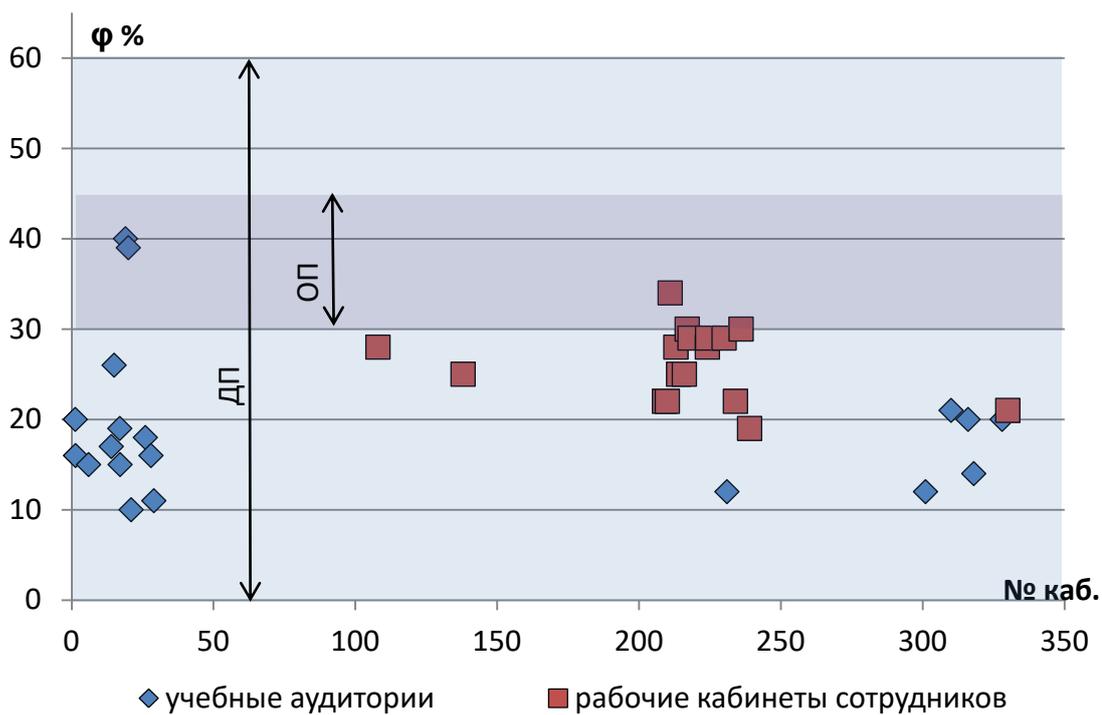


в)

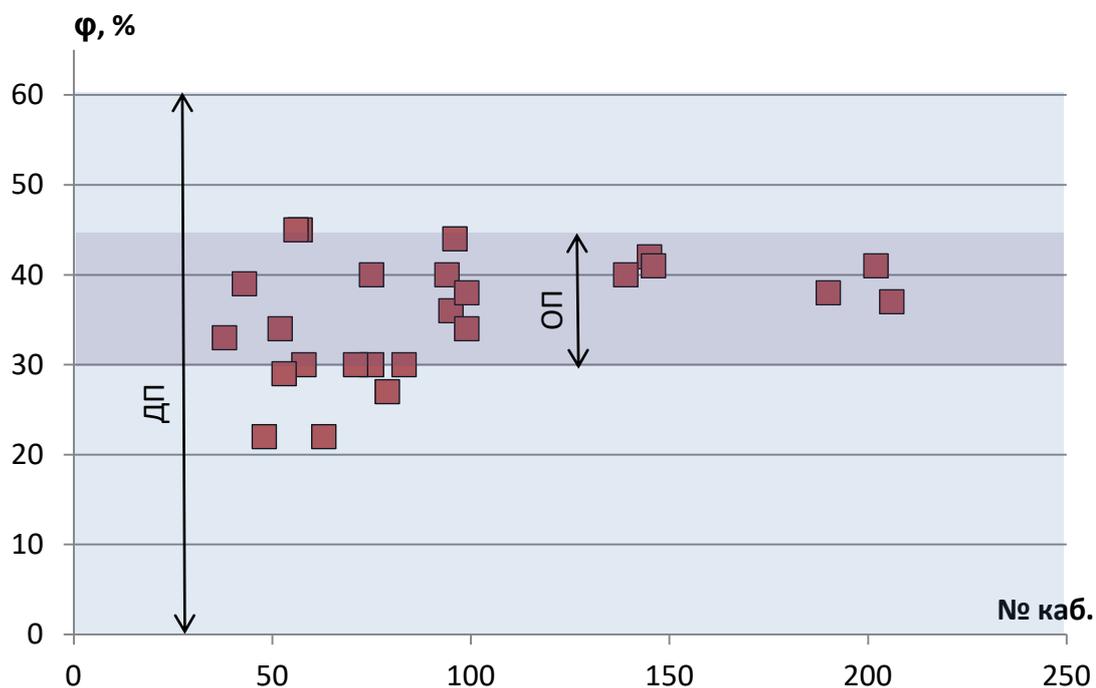
Рисунок 2.3 – Температура воздуха в помещениях ВУЗа: а – учебный корпус «А»; б – учебный корпус «Б»; в – общежития; ДП – диапазон допустимых значений температуры воздуха в соответствии с ГОСТ 30494 [27]; ОП – диапазон оптимальных значений температуры воздуха в соответствии с ГОСТ 30494 [27]



а)

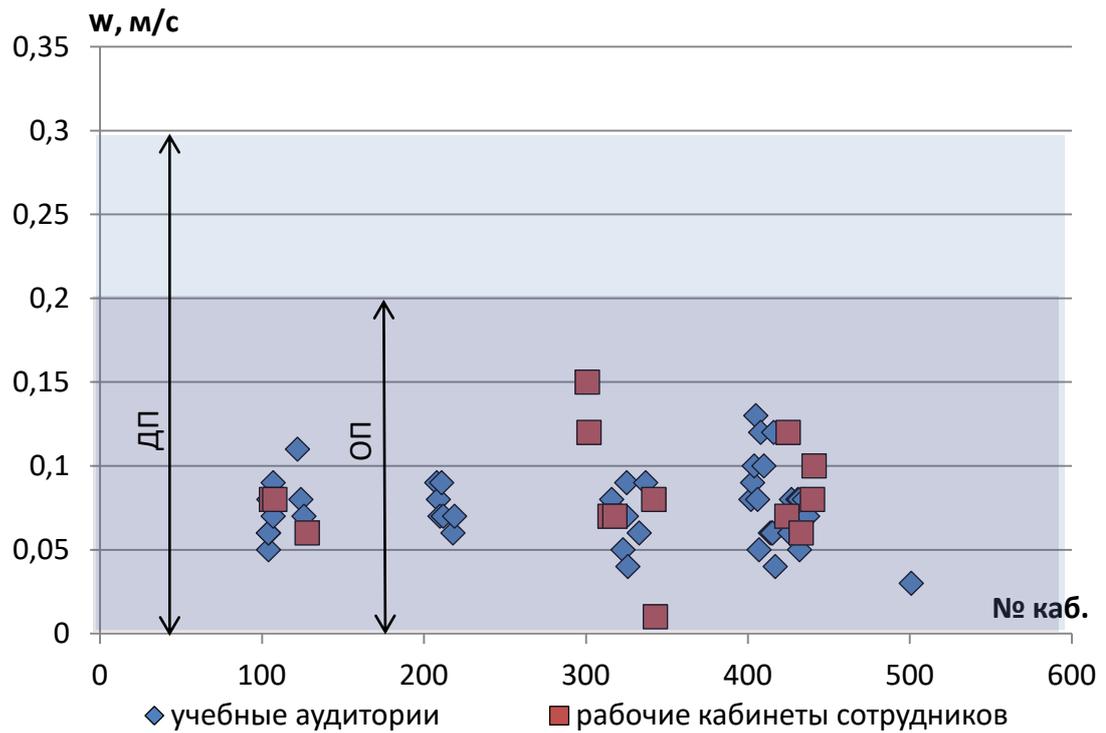


б)

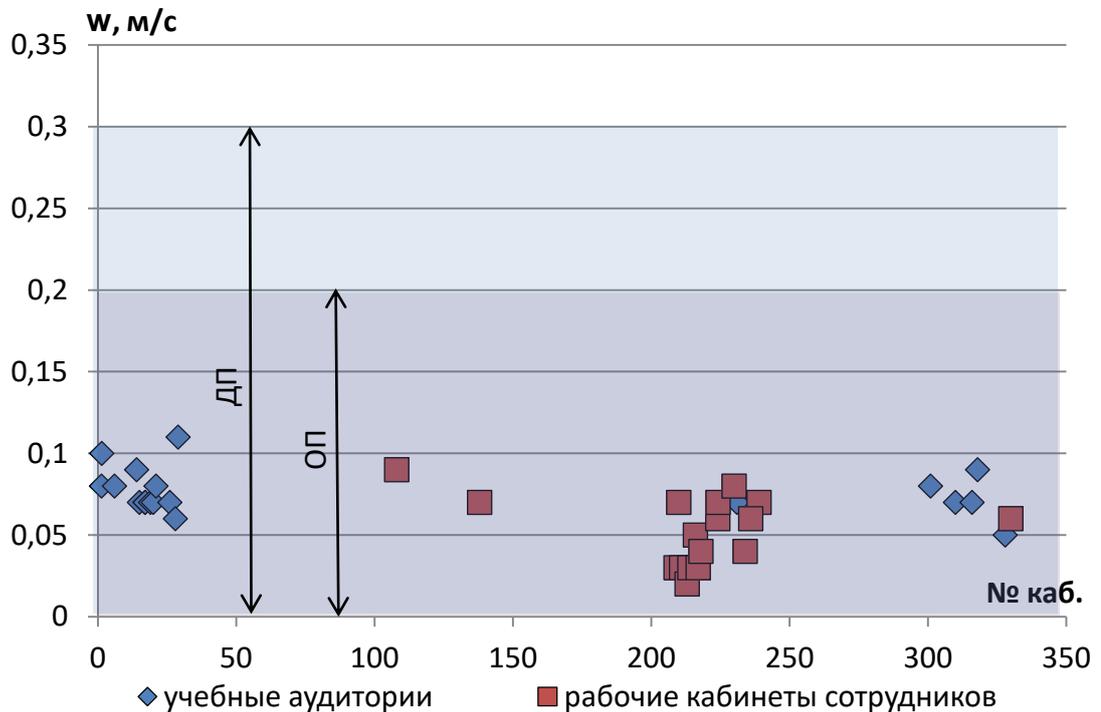


в)

Рисунок 2.4 – Относительная влажность воздуха в помещениях ВУЗа: а – учебный корпус «А»; б – учебный корпус «Б»; в – общежития; ДП – диапазон допустимых значений относительной влажности воздуха в соответствии с ГОСТ 30494 [27]; ОП – диапазон оптимальных значений относительной влажности воздуха в соответствии с ГОСТ 30494 [27]



а)



б)

Рисунок 2.5 – Подвижность воздуха в помещениях ВУЗа: а – учебный корпус «А»; б – учебный корпус «Б»; ДП – диапазон допустимых значений подвижности воздуха в соответствии с ГОСТ 30494 [27]; ОП – диапазон оптимальных значений подвижности воздуха в соответствии с ГОСТ 30494 [27]

На рисунках 2.3 – 2.5 под учебными аудиториями понимаются помещения, где отсутствует возможность дополнительного регулирования температуры воздуха. Рабочие кабинеты сотрудников – помещения, в которых существует возможность дополнительного регулирования параметров микроклимата.

Анализ результатов измерения параметров внутренней среды помещений (рисунки 2.3 – 2.5) показал, что в учебных аудиториях, в которых значения параметров микроклимата определялись только работой системы отопления и системы вентиляции, температура, относительная влажность и подвижность воздуха находились в диапазоне оптимальных и допустимых значений в соответствии с ГОСТ 30494 [27].

В рабочих кабинетах, которые предназначены для ежедневного и длительного пребывания людей и в которых существовала возможность регулирования параметров микроклимата за счет использования дополнительных устройств и оборудования, температура воздуха в большей части обследованных помещений превышала и оптимальные и допустимые значения. Относительная влажность при этом находилась в диапазоне допустимых значений, а подвижность воздуха – в пределах оптимальных значений согласно ГОСТ 30494 [27].

Таким образом, результаты измерений показали, что при существовании возможности дополнительного регулирования параметров микроклимата в помещениях, человек стремится обеспечить для себя комфортные условия, которые не соответствуют значениям характеристик воздушной среды, рекомендуемым нормативными документами и используемым при оценке эффективности энергосберегающих мероприятий. На создание субъективного для человека комфортного микроклимата затрачивается дополнительная энергия (привод вентиляторов, нагревательные элементы, охлаждающие воздух электрические устройства), которая должна быть учтена при оценке эффективности энергосберегающих мероприятий. Одним из способов повысить точность оценки эффективности энергосберегающих мероприятий является использование в качестве расчетных параметров внутренней среды помещений комфортные для человека условия.

2.4 Степень комфортности микроклимата

Каждому численному значению уровня комфортности микроклимата в соответствие ставится характеристика субъективного ощущения комфорта у человека – степень комфортности. На основе [50, 51, 69], а также статистической обработки экспериментальных данных по взаимосвязи параметров микроклимата и ощущения комфорта была разработана таблица 2.3, в которой приведено соответствие уровня комфортности микроклимата и примерной оценки ощущения комфортности «среднестатистическим» человеком.

Таблица 2.3 – Уровень и степень комфортности микроклимата

$U_{ком}$	Степень комфортности	$U_{ком}$	Степень комфортности
$< -0,5$	холодно, дискомфорт	$0,1 \div 0,3$	тепло, но комфортно
$-0,5 \div -0,3$	прохладно, легкий дискомфорт	$0,30 \div 0,5$	тепло, легкий дискомфорт
$-0,3 \div -0,1$	прохладно, но комфортно	$0,5 <$	жарко, дискомфорт
$-0,1 \div 0,1$	комфортно		

2.5 Определение уровня и степени комфортности учебной аудитории

Практическое применение разработанного метода рассмотрим на примере определения уровня и степени комфортности микроклимата для студентов в учебной аудитории ИГЭУ в теплый период года при следующих исходных данных:

– метаболическая теплота, характерная для данного типа работ, $q_{MT} = 93$ Вт/м² [58, 69];

– КПД механической работы, выполняемой студентами, $\eta = 0$ [58, 69];

– относительная скорость перемещения студентов в неподвижном воздухе $w_0 = 0$ м/с [69];

– присутствующие в помещении учащиеся одеты в легкие брюки и рубашки с коротким рукавом, для которых ориентировочное термическое сопротивление одежды $R_0 = 0,5$ кло [69];

– параметры микроклимата (экспериментальные значения): $T_B = 23 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $\varphi = 45 \%$; $T_o = 29 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $w = 0,05 \text{ м/с}$; $T_{w,min} = 18 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{w,max} = 22 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $C_B = 350 \text{ ppm}$; $C_{oc} = 30 \text{ ppm}$.

Внутреннюю теплопродукцию тела человека рассчитываем по формуле (2.4):

$$q_{III} = q_{MT}(1 - \eta) = 93(1 - 0) = 93 \text{ Вт/м}^2.$$

Температуру кожного покрова человека рассчитываем по формуле (2.6):

$$T_{\kappa} = 35,7 - 0,032q_{III} = 35,7 - 0,032 \cdot 93 = 32,7 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Парциальное давление водяных паров во влажном воздухе находим по формуле (2.7):

$$\begin{aligned} p_e &= 0,01\varphi(0,305T_e^2 - 0,1027T_e + 7,3596) = \\ &= 0,01 \cdot 45(0,305 \cdot 23^2 - 0,1027 \cdot 23 + 7,3596) = 0,75 \text{ мм рт. ст.} \end{aligned}$$

Потери теплоты через кожу человека за счет диффузии паров составляют (формула (2.5))

$$q_{ДП} = 0,41(1,92T_{\kappa} - 25,3 - p_e) = 0,41(1,92 \cdot 32,7 - 25,3 - 0,75) = 15,08 \text{ Вт/м}^2.$$

Количество теплоты, затрачиваемое на испарение жидкости с поверхности тела человека, определяем по формуле (2.8):

$$q_{ИП} = 0,49(q_{MT}(1 - \eta) - 50) = 0,49(93(1 - 0) - 50) = 21,1 \text{ Вт/м}^2.$$

Скрытая теплота, выделяемая в процессе дыхания, составляет (формула (2.9)):

$$q_{ДС} = 0,0027q_{MT}(44 - p_e) = 0,0027 \cdot 93(44 - 0,745) = 10,1 \text{ Вт/м}^2.$$

Явную теплоту, выделяемую в процессе дыхания, рассчитываем по формуле (2.10):

$$q_{ДЯ} = 0,0014q_{MT}(34 - T_e) = 0,0014 \cdot 93(34 - 23) = 1,4 \text{ Вт/м}^2.$$

Теплоту, которую необходимо удалять излучением и конвекцией с поверхности тела человека для обеспечения его комфортного теплового состояния, рассчитываем по формуле (2.3):

$$q_z = q_{ТП} - q_{ДП} - q_{ИП} - q_{ДС} - q_{ДЯ} = 93 - 15,1 - 21,1 - 10,9 - 1,4 = 44,6 \text{ Вт/м}^2.$$

Лучистый тепловой поток, уходящий с поверхности тела человека, находим по формуле (2.12):

$$\begin{aligned} q_L &= \varepsilon \sigma \varphi_{c-w} \left[(T_o + 273)^4 - (T_{w,o} + 273)^4 \right] = \\ &= 0,8 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 0,8 \left[(29 + 273)^4 - (21 + 273)^4 \right] = 30,7 \text{ Вт/м}^2. \end{aligned}$$

где средняя радиационная температура помещения равна

$$T_{w,o} = T_g - 2 = 23 - 2 = 21 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Конвективный тепловой поток, уходящий с поверхности тела человека, рассчитываем по формуле (2.14):

$$q_K = 12,1 \sqrt{w + w_0} (T_o - T_g) = 12,1 \sqrt{0,05 + 0} (29 - 23) = 16,2 \text{ Вт/м}^2.$$

Суммарный тепловой поток, уходящий с поверхности тела человека, составляет (формула (2.11))

$$q_n = q_L + q_K = 30,7 + 16,2 = 46,9 \text{ Вт/м}^2.$$

Рассчитав тепловые потоки q_z и q_n , находим значение коэффициента теплового комфорта человека $K_{ТК}$

$$K_{ТК} = \frac{q_z - q_n}{q_z} = \frac{44,6 - 46,9}{44,6} = -0,051.$$

Далее находим поправки на основные вредности в учебной аудитории: поправку на радиационное охлаждение (ε_1), поправку на асимметрию теплового излучения (ε_2).

Находим коэффициент учета радиационного охлаждения человека. Лучистый тепловой поток, поступающий на самую холодную ограждающую поверхность помещения от поверхности тела человека равен (формула (2.15)):

$$\begin{aligned} q_{ЛТ} &= \varepsilon \sigma \varphi_{t-w, \min} \left[(T_o + 273)^4 - (T_{p, \min} + 273)^4 \right] = \\ &= 0,8 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 0,136 \left[(29 + 273)^4 - (18 + 273)^4 \right] = 6,9 \text{ Вт} / \text{м}^2. \end{aligned}$$

Поправку ε_1 рассчитываем по формуле (2.16):

$$\varepsilon_1 = 1 + \frac{q_{ЛТ}}{q_2} = 1 + \frac{6,9}{44,6} = 1,156.$$

Для учета асимметрии радиационного излучения рассчитываем поправку ε_2 :

$$\begin{aligned} \varepsilon_2 &= 1 + 0,01(-0,0145\Delta T_a^3 + 0,4701\Delta T_a^2 + 0,8108\Delta T_a - 1,4049) = \\ &= 1 + 0,01(-0,0145 \cdot 4^3 + 0,4701 \cdot 4^2 + 0,8108 \cdot 4 - 1,4049) = 1,0843, \end{aligned}$$

где максимальная разность температур ограждающих поверхностей равна (формула (2.18)):

$$\Delta T_a = T_{w, \max} - T_{w, \min} = 22 - 18 = 4 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Затем определяем коэффициент качества воздушной среды $K_{КС}$, предварительно рассчитав избыточную концентрацию CO_2 в помещении по формуле (2.19):

$$\Delta C = C_e - C_{oc} = 350 - 30 = 320 \text{ ppm};$$

Тогда коэффициент качества воздушной среды равен (формула (2.20)):

$$K_{КС} = 0.$$

Принимаем, что дополнительные примеси, снижающие качество воздушной среды, отсутствуют, и поэтому поправка $\varepsilon_3 = 1$. Коэффициент β для зданий производственного назначения равен 1.

На последнем этапе расчета находим уровень комфортности микроклимата $U_{ком}$ по формуле (2.1) и делаем вывод о степени комфортности микроклимата:

$$U_{ком} = \beta(K_{TK} \cdot \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 + K_{KC} \varepsilon_3) = 1 \cdot (-0,051 \cdot 1,156 \cdot 1,0843 - 0 \cdot 1) = -0,0639.$$

Уровень комфортности в студенческой аудитории, равный $U_{ком} = -0,0639$ по данным таблицы 2.2, соответствует состоянию человека, которое можно оценить как «комфортно».

Заметим, что в рассмотренном примере влияние асимметрии радиационного излучения и радиационного охлаждения на комфортность микроклимата невелико и составляет 0,0843% и 0,156% от $U_{ком}$ соответственно.

2.6 Верификация метода оценки комфортности микроклимата

Сравним результаты оценки комфортности внутренней среды по предложенному в диссертации методу и методу, изложенному в [29], рассчитав показатели PMV и PPD для примера, рассмотренного в разделе 2.5 работы:

$$\begin{aligned} PMV = & (0,303e^{-0,036q_{MT}} + 0,028)((q_{MT} - q_p) - 3,05 \cdot 10^{-3}(5733 - 6,99(q_{MT} - q_p) - \\ & - p_s) - 0,42((q_{MT} - q_p) - 58,15) - 1,7 \cdot 10^{-5}q_{MT}(5867 - p_s) - 0,0014q_{MT}(34 - T_s) - \\ & - 3,96 \cdot 10^{-8}f_o((T_o + 273)^4 - (T_{w,p} + 273)^4) - f_o\alpha(T_o - T_s), \end{aligned}$$

Значение температуры поверхности одежды T_o и коэффициента конвективной теплоотдачи α определяем итерационным методом. В результате получаем значение температуры поверхности одежды $T_o = 28,5$ °С, коэффициента конвективной теплоотдачи $\alpha = 3,64$ Вт/(м²·°С). Коэффициент прикрытия одеждой части тела по отношению к голой коже в соответствии с формулой (1.3) составит $f_o = 1,145$.

Используя исходные данные для расчета уровня комфортности микроклимата для студентов в учебной аудитории в теплый период года, получим значение $PMV = -0,24$. Прогнозируемый процент недовольных качеством микроклимата людей по формуле (1.5) составит при этом $PPD = 5,1$ %. В соответствии с данными таблицы 1.2, при $-0,5 < PMV < 0,5$ и $PPD < 10$ уровень качества микроклимата можно отнести ко второй категории и охарактеризовать как «нормальный» (следует использовать для вновь строящихся и реконструируемых зданий).

Далее выполним оценку комфортности микроклимата, рассчитав $U_{ком}$ и показатели PMV и PPD для данных, приведенных в таблице 2.1. Принимаем, что $K_{КС} = 0$, поскольку показатели PMV и PPD оценивают характеристики тепло- и влагообмена человека с окружающей средой. Результаты анализа комфортности микроклимата приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Комфортность микроклимата в помещении по $U_{ком}$ и показателям PMV и PPD

№	Параметры воздуха в помещении			Разработанный метод		EN 15251		
	$T_v, ^\circ\text{C}$	$\varphi, \%$	$w, \text{м/с}$	$U_{ком}$	степень комфортности микроклимата	PMV	PPD	категория помещения по уровню качества микроклимата
1	26,6	43	0,01	0,762	жарко, дискомфорт	0,83	15,98	прочее: категория может быть использована ограниченное время года
2	24,8	27	0,12	0,494	тепло, легкий дискомфорт	0,65	9,18	удовлетворительный: может использоваться для существующих зданий
3	22,7	27	0,01	0,189	тепло, но комфортно	0,27	5,13	нормальный: следует использовать для вновь строящихся и реконструируемых зданий
4	22,8	27	0	0,191	тепло, но комфортно	0,31	5,21	нормальный: следует использовать для вновь строящихся и реконструируемых зданий
5	23	23	0,16	0,182	тепло, но комфортно	0,45	6,00	нормальный: следует использовать для вновь строящихся и реконструируемых зданий
6	25,3	28	0,11	0,572	жарко, дискомфорт	0,80	14,38	прочее: категория может быть использована ограниченное время года
7	28,5	43	0,15	1,029	жарко, дискомфорт	1,9	96,09	прочее: категория может быть использована ограниченное время года

Анализ таблицы 2.4 показывает, что результаты оценки уровня комфортности микроклимата по уровню и степени комфортности микроклимата хорошо коррелируются с методикой, изложенной в EN 15251.

2.7 Влияние вредностей, характерных для помещений непроизводственного назначения, на уровень комфортности микроклимата

Экспериментальные исследования влияния параметров внутренней среды помещения на тепловой комфорт человека, приведенные в разделе 2.2 работы, а также исследования российских и зарубежных ученых, направленные на изучение условий создания комфортного микроклимата [21, 36, 37, 39, 50, 79], показали, что для зданий, предназначенных для длительного пребывания человека, наиболее характерными вредностями, отрицательно влияющими на комфортность микроклимата являются асимметрия теплового излучения, радиационное охлаждение, а также содержание углекислого газа.

Значение поправки, учитывающей влияние на комфортность микроклимата радиационного охлаждения (ε_1), определяется температурой наиболее холодной поверхности помещения. На рисунке 2.6 приведено относительное изменение уровня комфортности микроклимата в зависимости от температуры наиболее холодной поверхности при $K_{КС} = 0$ и $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 1$ для различных значений температуры воздуха в помещении.

Анализ рисунка 2.6 показывает, что снижение температуры ограждающих поверхностей приводит к отклонению уровня комфортности микроклимата от базового значения, в качестве которого приняты результаты расчета примера в главе 4.3 ($U_{ком} = -0,059$ при $K_{КС} = 0$ и $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 1$). При этом изменение уровня комфортности может достигать 30 %. Поправка ε_1 не влияет на уровень комфортности микроклимата, если температура ограждающих поверхностей ниже температуры воздуха в помещении не более, чем на 2 °С.

Поправка на асимметрию радиационного излучения (ε_2) определяется отличием температуры наиболее теплой и наиболее холодной поверхностей помещения (ΔT_a). На рисунке 2.7 приведено относительное изменение уровня комфортности микроклимата от величины ΔT_a по сравнению с базовым значением ($U_{ком} = -0,055$ при $K_{КС} = 0$ и $\varepsilon_1 = \varepsilon_3 = 1$).

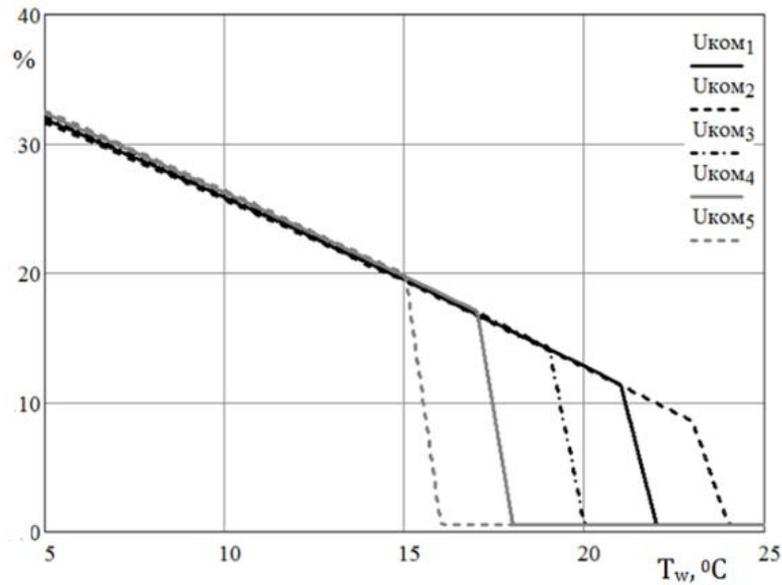


Рисунок 2.6 – Относительное изменение уровня комфорта микроклимата в зависимости от температуры наиболее холодной поверхности помещения (T_w): $U_{ком,1} - T_g = 24$ °C; $U_{ком,2} - T_g = 22$ °C; $U_{ком,3} - T_g = 20$ °C; $U_{ком,4} - T_g = 18$ °C; $U_{ком,5} - T_g = 26$ °C

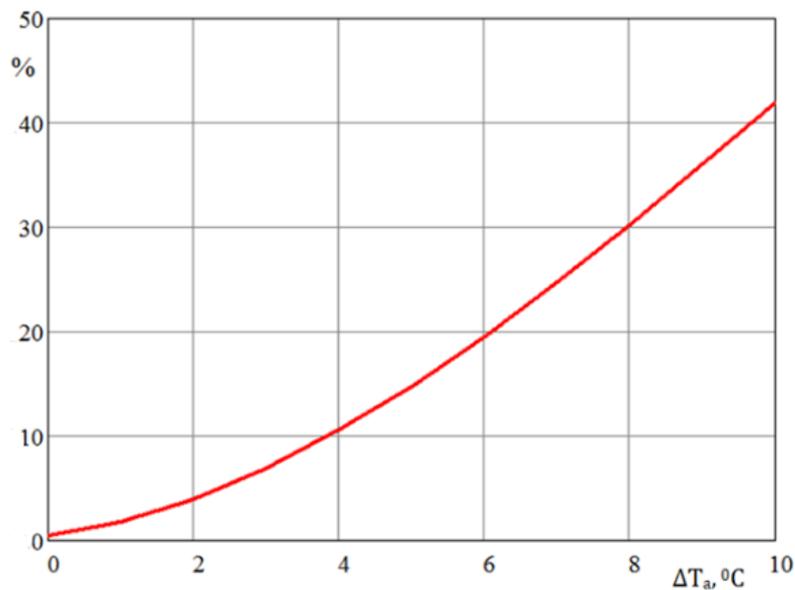


Рисунок 2.7 – Относительное изменение уровня комфорта микроклимата в зависимости от величины асимметрии радиационной температуры (ΔT_a)

Анализ рисунка 2.7 показывает, что при $\Delta T_a < 4$ °C относительное изменение уровня комфорта микроклимата составляет не более 10%.

На рисунке 2.8 приведено относительное изменение уровня комфорта микроклимата в зависимости от избыточной концентрации углекислого газа в

воздухе помещения (ΔC) по сравнению с базовым значением ($U_{ком} = -0,051$ при $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 1$).

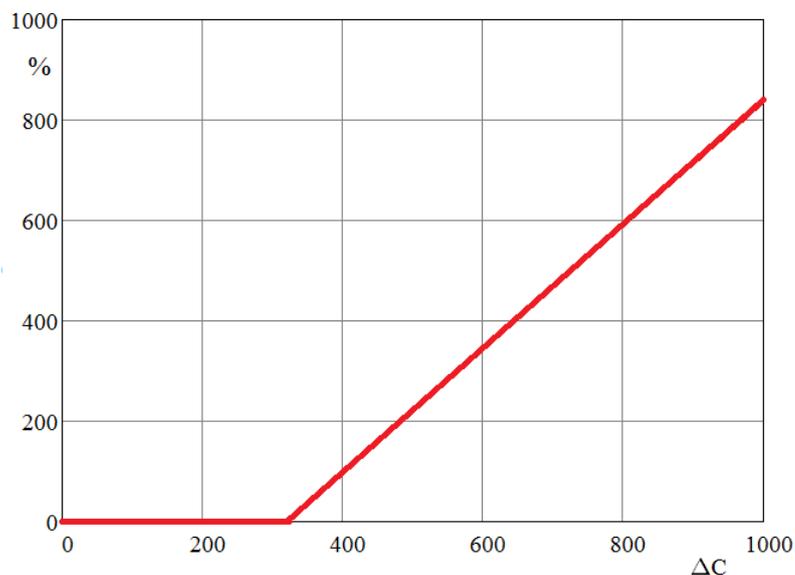


Рисунок 2.8 – Относительное изменение уровня комфорта микроклимата в зависимости от избыточной концентрации углекислого газа в воздухе помещения (ΔC , ppm)

Анализ рисунка 2.8 показывает, что качество воздуха оказывает значительное влияние на комфортность микроклимата помещений. Например, при значении избыточной концентрации углекислого газа более 1000 ppm, уровень комфорта микроклимата изменяется более чем в 8 раза (концентрация углекислого газа опасна для здоровья человека).

2.8 Влияние систем энергоснабжения на параметры внутренней среды помещений

В ряде случаев, системы энергоснабжения здания не позволяют поддерживать в помещении параметры внутренней среды, обеспечивающие комфортный тепловой, влажностный и воздушный режим для заданного типа работ из-за отсутствия возможности регулирования теплопотребления объекта, недостаточной или избыточной мощности отопительных приборов, а подвижность воздуха в зданиях с естественной вентиляцией зависит от

конструктивных особенностей объекта и условий внешней среды (скорости и направления ветра, атмосферного давления). В этом случае расчетным или графическим методом может быть определена комбинация параметров микроклимата, максимально близко удовлетворяющая требованиям теплового комфорта. В таблице 2.5 приведены варианты параметров внутренней среды, обеспечивающих различные значения уровня и степени комфортности микроклимата для примера, рассмотренного в разделе 2.5. Графически результаты расчетов представлены на рисунках 2.9 и 2.10.

Таблица 2.5– Комбинации параметров микроклимата, обеспечивающие разные уровни комфортности микроклимата

№ п/п	$T_{в}, ^\circ\text{C}$	$U_{ком}$	$w, \text{ м/с}$			
			$\varphi = 15 \%$	$\varphi = 30 \%$	$\varphi = 45 \%$	$\varphi = 60 \%$
1	18	-0,1 ÷ 0,1	–	–	–	–
		-0,3 ÷ 0,3	–	–	–	–
		-0,5 ÷ 0,5	0 ÷ 0,014	0 ÷ 0,013	0 ÷ 0,013	0 ÷ 0,013
2	20	-0,1 ÷ 0,1	–	–	–	–
		-0,3 ÷ 0,3	–	–	–	–
		-0,5 ÷ 0,5	0 ÷ 0,039	0 ÷ 0,04	0 ÷ 0,041	0 ÷ 0,042
3	22	-0,1 ÷ 0,1	0 ÷ 0,017	0 ÷ 0,018	0 ÷ 0,019	0 ÷ 0,019
		-0,3 ÷ 0,3	0 ÷ 0,075	0 ÷ 0,077	0 ÷ 0,078	0 ÷ 0,08
		-0,5 ÷ 0,5	0 ÷ 0,159	0 ÷ 0,161	0 ÷ 0,164	0 ÷ 0,166
4	24	-0,1 ÷ 0,1	0,05 ÷ 0,166	0,052 ÷ 0,169	0,053 ÷ 0,172	0,055 ÷ 0,175
		-0,3 ÷ 0,3	0 ÷ 0,335	0 ÷ 0,34	0 ÷ 0,345	0 ÷ 0,35
		-0,5 ÷ 0,5	0 ÷ 0,557	0 ÷ 0,564	0 ÷ 0,572	0 ÷ 0,579
5	26	-0,1 ÷ 0,1	0,538 ÷ 1,068	0,547 ÷ 1,084	0,556 ÷ 1,1	0,566 ÷ 1,166
		-0,3 ÷ 0,3	0,182 ÷ 1,772	0,186 ÷ 1,797	0,191 ÷ 1,821	0,195 ÷ 1,845
		-0,5 ÷ 0,5	0 ÷ 2,651	0 ÷ 2,685	0 ÷ 2,72	0 ÷ 2,754

Для общественного здания, номограммы для которого приведены на рисунках 2.9 и 2.10, в соответствии с ГОСТ 30494 «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях» [27], температура воздуха в холодный период года должна находиться в интервале 19 – 21 °С (оптимальные условия) или 18 – 23 °С (допустимые условия), а относительная

влажность должна иметь значения 30 – 45% (оптимальные условия) или быть не более 60% (допустимые значения).

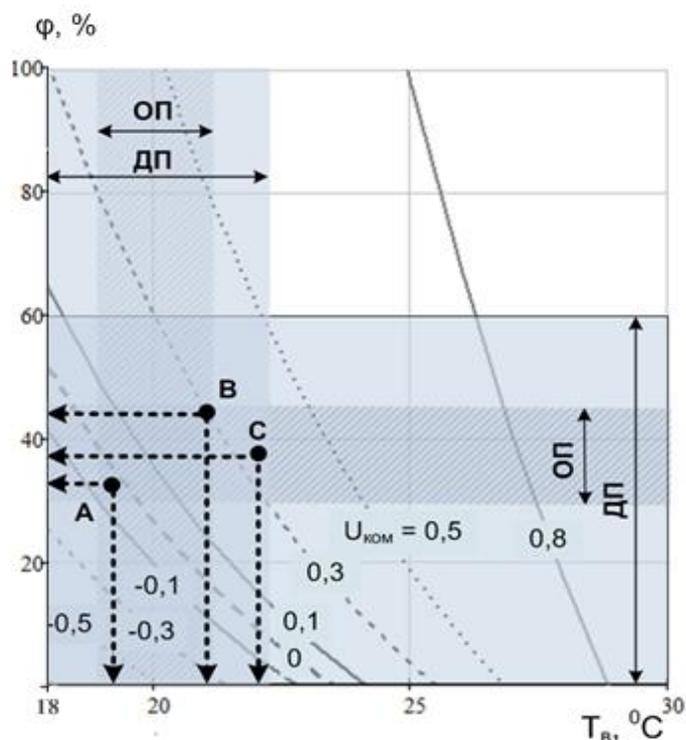


Рисунок 2.9 – Номограмма для определения температуры и относительной влажности воздуха (при подвижности воздуха $w = 0,05$ м/с): ОП и ДП – соответственно области оптимальных и допустимых значений температуры и относительной влажности воздуха для холодного периода года в помещениях 2-ой категории по ГОСТ – 30494 [27]

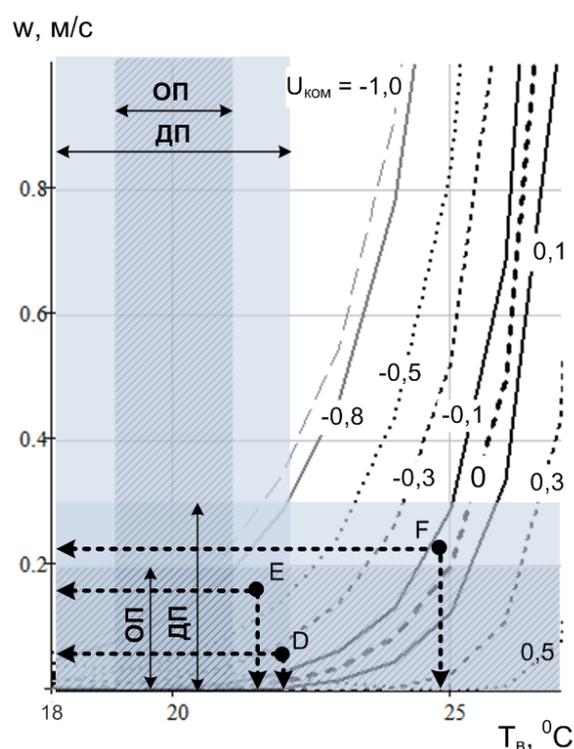


Рисунок 2.10 – Номограмма для определения комфортной температуры и подвижности воздуха (при относительной влажности воздуха $\phi = 45\%$): ОП и ДП – соответственно области оптимальных и допустимых значений температуры и подвижности воздуха для холодного периода года в помещениях 2-ой категории по ГОСТ – 30494 [27]

На рисунке 2.9 точка *A* определяет возможное сочетание относительной влажности и температуры воздуха в помещении для условий примера (раздел 2.5) для обеспечения комфортного микроклимата ($U_{ком} = -0,1 \div 0,1$). Параметры точек *B* и *C* лежат за диапазоном комфортного микроклимата ($U_{ком} > 0,3$), но входят в диапазон «оптимальных» (точка *B*) и допустимых (точка *C*) параметров внутренней

среды по ГОСТ 30494 «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях».

На рисунке 2.10 точкой *D* показана комбинация температуры и подвижности воздуха для обеспечения степени комфортности «прохладно, но комфортно» ($U_{ком} = -0,1 \div -0,3$) в помещениях 2-категории по ГОСТ-30494 [27] при относительной влажности воздуха в помещении $\phi = 45 \%$. Указанные на рисунках 2.9 и 2.10 точки *A*, *B*, *C*, *D* и *E* одновременно соответствуют допустимым, а в некоторых случаях и оптимальным, параметрам микроклимата по ГОСТ 30494 для данного типа работ.

Анализ рисунков 2.9 и 2.10 показывает, что диапазон допустимых и оптимальных параметров микроклимата, рекомендуемый ГОСТ 30494 [27], не полностью включает в себя область параметров внутренней среды помещения, соответствующую комфортному микроклимату ($U_{ком} = -0,1 \div -0,1$). Так, например, комбинация параметров микроклимата, указанное точкой *F* (рис. 2.10), соответствует комфортному микроклимату, но находится за границей оптимальных параметров по подвижности воздуха и за пределами допустимых и оптимальных параметров по температуре воздуха. Нижняя граница допустимых параметров микроклимата (для ряда объектов – оптимальных параметров микроклимата), которая используются при расчете показателей работы систем энергоснабжения, а также при оценке эффективности энергосберегающих мероприятий, сосредоточена большей своей частью в диапазоне уровня комфортности микроклимата $U_{ком} = -0,1 \div -0,8$, то есть приходится на некомфортно холодный микроклимат.

Таким образом, поддержание в помещении параметров микроклимата, соответствующих требованиям [27] не всегда будет обеспечивать комфортный для человека тепловлажностный и воздушный режим помещения, а поддержание комфортного для человека микроклимата не всегда означает создание условий, предусмотренных ГОСТ 30494.

Поскольку системы формирования микроклимата (отопления, вентиляции и кондиционирования) обеспечивают возможность регулирования параметров

микроклимата в ограниченном диапазоне значений, то оптимальный уровень комфортности ($U_{ком} = - 0,1 \div 0,1$) и соответствующие ему характеристики внутренней среды определяют методом сканирования вариантов при помощи компьютерной программы УСК01 (раздел 4.3) или графическим методом по номограммам. При этом фиксируется тот параметр, регулирование значения которого возможно. Далее определяют, параметры микроклимата в помещении, которые необходимо поддерживать для обеспечения комфортного микроклимата ($U_{ком} = - 0,1 \div 0,1$). Если рассчитанные параметры лежат вне диапазона параметров, которые могут быть обеспечены в помещении системами энергоснабжения, то можно сделать вывод о невозможности создания комфортного микроклимата. Далее выбирают параметры микроклимата при которых возможно поддерживать максимально близкое к комфортному микроклимату состояние внутренней среды.

2.9 Расчет уровня комфортности микроклимата в зависимости от физиологических особенностей организма человека

Для повышения точности определения комбинаций параметров микроклимата, соответствующих оптимальному уровню комфортности ($U_{ком} = 0$) метод оценки комфортности микроклимата так же может быть дополнен учетом поправок, отражающих физиологические особенности находящихся в помещении людей (пол, возраст и т.п.).

Комфортность теплового состояния человека в помещении определяет его тепловой баланс. При этом в расчете количества тепловой энергии, которое должно быть удалено с поверхности тела человека (q_2) в результате теплообмена с окружающей средой, учитывается величина метаболической теплоты (q_{MT}), которая зависит, в том числе, от пола и возраста человека (рис. 2.11) [5, 58].

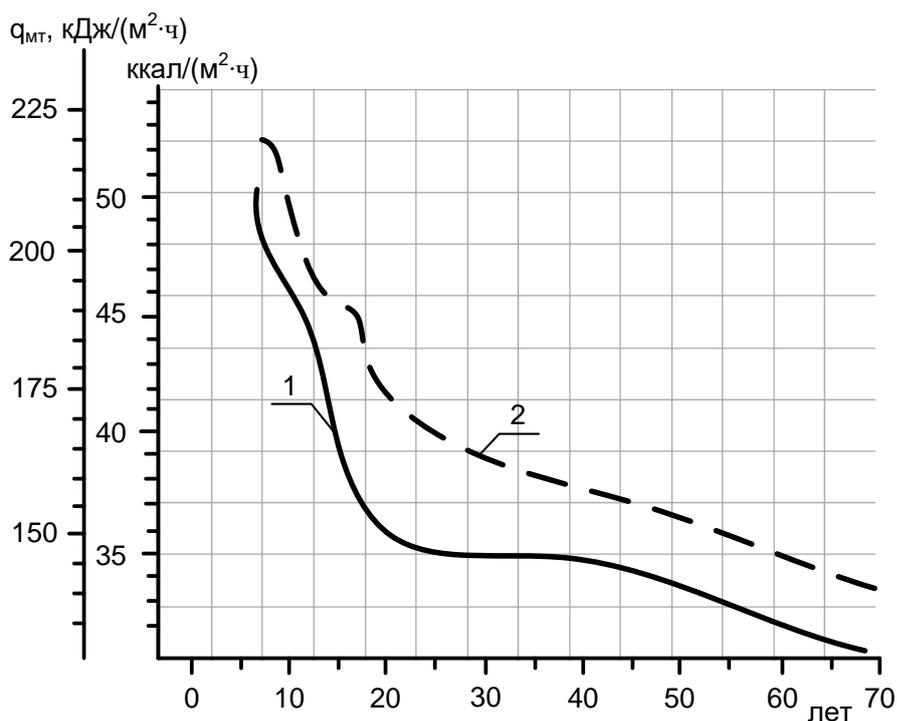


Рисунок 2.11 – Метаболическая теплота человека в зависимости от его пола и возраста [5]:

1 – женщины; 2 – мужчины

На рисунках 2.12 и 2.13 приведены номограммы для выбора параметров микроклимата, обеспечивающих состояние комфорта в помещении, предназначенном для выполнения стандартной работы в административном помещении (печать текста, использование калькулятора, ручное написание текста), в зависимости от пола человека.

Анализ рисунков 2.12 и 2.13 показывает, что при выборе параметров микроклимата обеспечивающих состояние теплового комфорта для женщин комфортные параметры сдвигаются в область более «теплых» значений за счет более низкой метаболической теплоты. Однако отличие требуемой для поддержания комфортного микроклимата температуры воздуха для мужчин и женщин составляет менее 1 °С, поэтому при определении комфортных параметров внутренней среды в помещении пол человека, находящегося в помещении можно не учитывать.

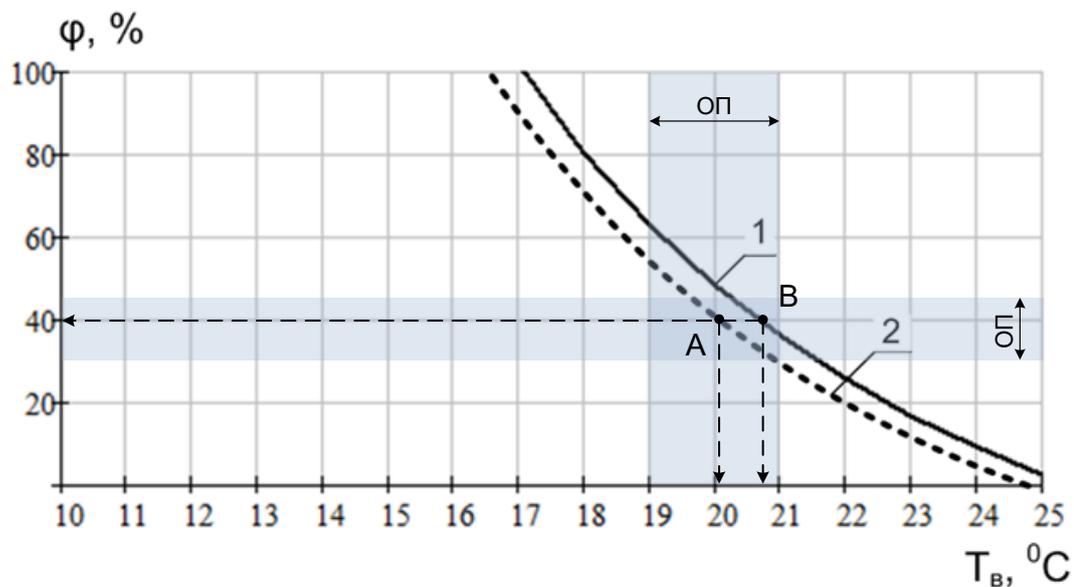


Рисунок 2.12 – Комфортная температура и относительная влажность воздуха (при подвижности воздуха $w = 0,05$ м/с): 1 – комфортные параметры микроклимата для женщин; 2 – комфортные параметры микроклимата для женщин мужчин; ОП – область допустимых параметров микроклимата по ГОСТ 30494 [27]

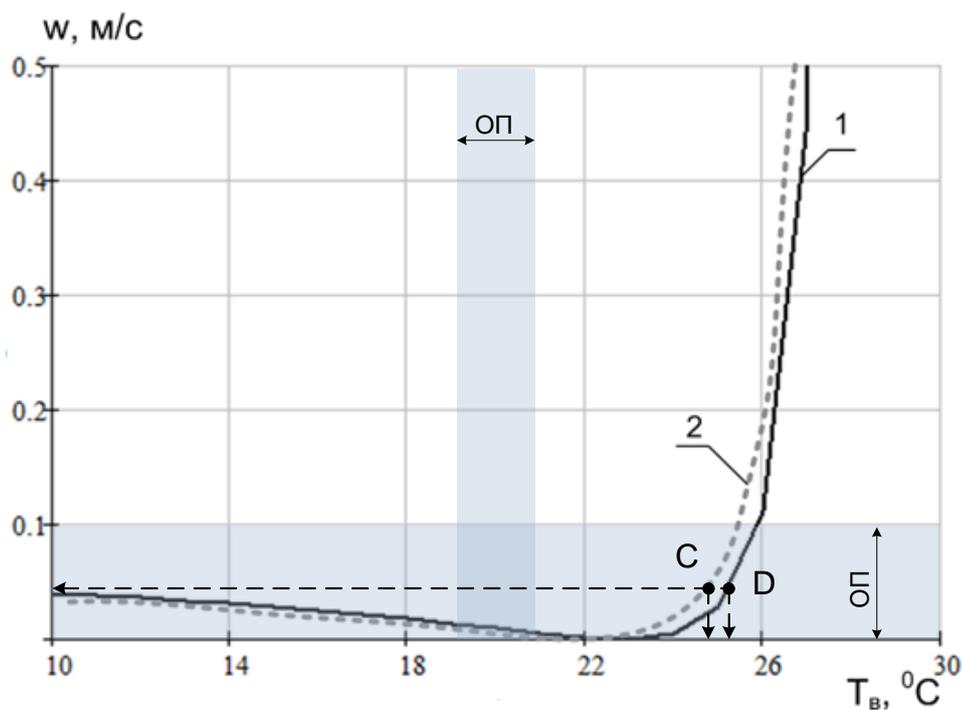


Рисунок 2.13 – Комфортная температура и подвижность воздуха (при относительной влажности воздуха $\varphi = 45$ %): 1 и 2 – соответственно графики, соответствующие комфортным параметрам микроклимата для мужчин и женщин

Метаболизм человека с возрастом снижается (см. рис. 2.11), следовательно, изменяются параметры микроклимата, при которых человек ощущает тепловой комфорт. На рисунках 2.14 и 2.15 приведены комбинации параметров внутренней среды, при которых микроклимат является комфортным для 20, 30, 50 и 60-ти летних людей.

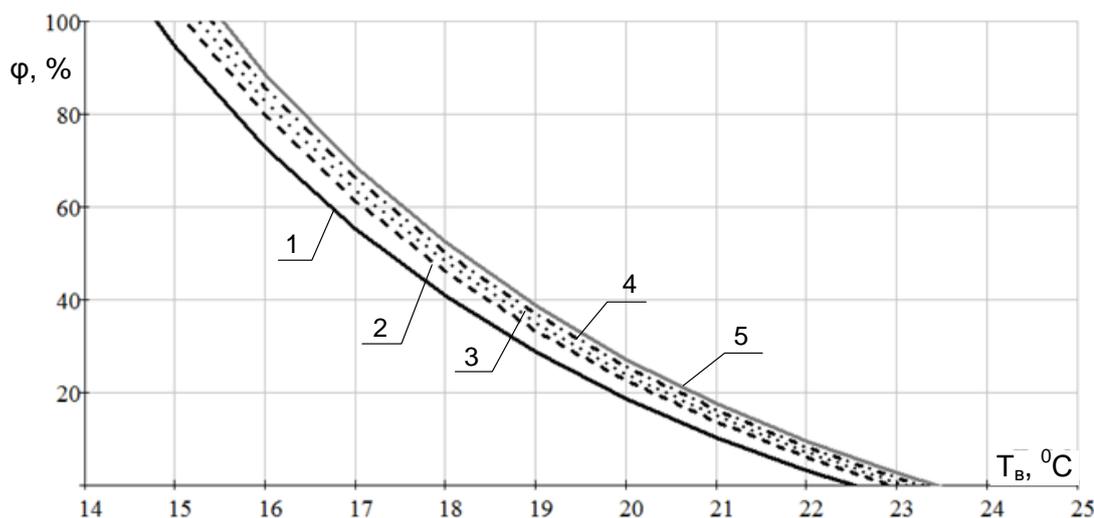


Рисунок 2.14 – Комфортная температура и относительная влажность воздуха (при подвижности воздуха $w = 0,05$ м/с): 1 – комфортные параметры микроклимата для 20-ти летних; 2 – для 30-ти летних; 3 – для 40-ка летних; 4 – для 50-ти летних; 5 – для 60-ти летних

При одинаковых значениях параметров внутренней среды уровень и степень комфортности микроклимата для людей разных возрастных групп будет отличаться за счет разной метаболической теплоты (рис. 2.11). Так, например, при температуре воздуха $T_g = 22$ °C, относительной влажности $\phi = 45$ % и подвижности воздуха $w = 0$ м/с, в соответствии с методикой, изложенной в разделе 2.1, степень комфортности микроклимата для 20-ти и 30-ти летних составит «комфортно» при уровнях комфортности микроклимата соответственно $U_{ком} = -0,028$ и $U_{ком} = -0,097$, а для 40, 50 и 60-ти летних – «прохладно, но комфортно» при уровнях комфортности микроклимата соответственно $U_{ком} = -0,125$, $U_{ком} = -0,155$ и $U_{ком} = -0,186$ (см. табл. 2.3).

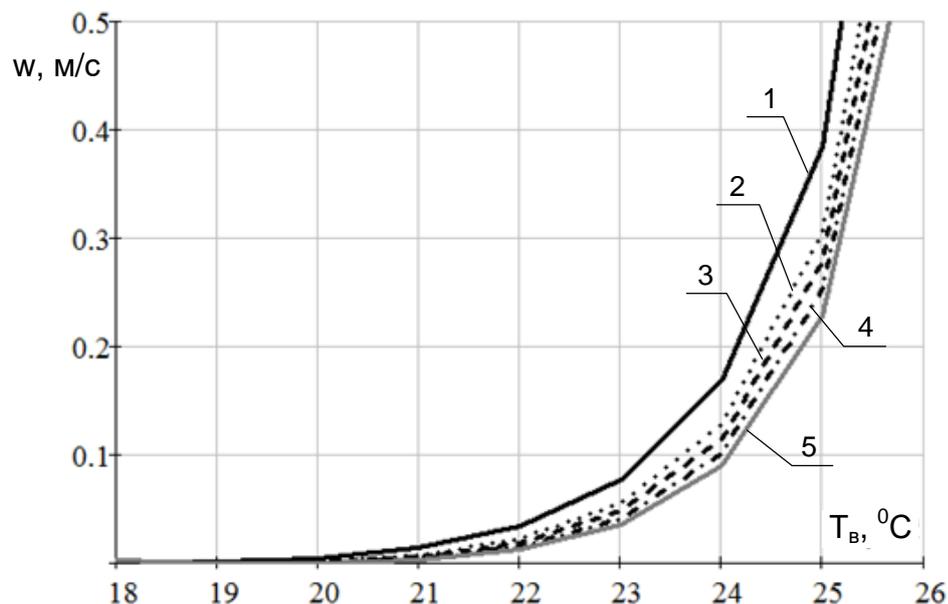


Рисунок 2.15 – Комфортная температура и подвижность воздуха (при относительной влажности воздуха $\varphi = 45\%$): 1 – комфортные параметры микроклимата для 20-ти летних; 2 – для 30-ти летних; 3 – для 40-ка летних; 4 – для 50-ти летних; 5 – для 60-ти летних

Отличие параметров микроклимата, при которых обеспечивается оптимальный уровень комфортности ($U_{ком} = 0$), для разных возрастных групп составляет не более $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ по температуре, не более 10% по относительной влажности и не более $0,1\text{ м/с}$ для подвижности воздуха.

Таким образом, для помещений, в которых находятся люди одного пола или одной возрастной группы при помощи предложенного метода оценки комфортности микроклимата может быть выполнено более точное определение комфортных параметров внутренней среды для снижения нагрузки на систему терморегуляции человека.

2.10 Выводы по главе 2

1. Разработан новый метод оценки комфортности в помещении производственного здания, основанный на расчете интегрального коэффициента теплового комфорта человека и коэффициента качества воздушной среды с учетом основных вредностей в помещении.

2. Экспериментально установлена связь теплового ощущения комфорта человека по шкале Кренко в зависимости от основных параметров микроклимата.

3. Выполнено экспериментальное исследование микроклимата в помещениях общественных зданий. Установлено, что при наличии в помещении возможности дополнительного местного регулирования отопительной нагрузки, параметры микроклимата отличаются от рекомендуемых значений, приведенных в нормативных документах.

4. Несоответствие ощущения теплового комфорта нормативным параметрам микроклимата должно учитываться при оценке эффективности энергосберегающих мероприятий. Одним из способов повысить точность оценки эффективности энергосберегающих мероприятий является использование в качестве расчетных параметров внутренней среды помещения комфортные для человека условия.

5. На основе экспериментальных и литературных данных разработана таблица соответствия уровня и степени комфорта микроклимата здания. Степень комфорта характеризует субъективное ощущение комфорта у среднестатистического человека.

8. Приведен пример применения предложенного метода для определения уровня и степени комфорта микроклимата для помещения учебной аудитории.

6. Выполнено сравнение результатов оценки комфортности микроклимата помещения здания непромышленного назначения по уровню комфортности микроклимата с методиками, изложенными в нормативных документах.

7. Выполнен анализ влияния на уровень комфортности микроклимата факторов внутренней среды помещения, определяющих значение коэффициента качества воздушной среды и поправок на радиационное охлаждение и асимметрию радиационного излучения.

8. Выполнен анализ влияния параметров внутренней среды помещения на комфортность микроклимата для человека в зависимости от его физиологических особенностей (возраста и пола).

ГЛАВА 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССООБМЕНА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ МИКРОКЛИМАТА В ЗДАНИЯХ НЕПРОИЗВОДСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Для оценки влияния энергосберегающих мероприятий на комфортность внутренней среды помещений необходим метод, позволяющий прогнозировать параметры микроклимата после реализации, частично или полностью, потенциала энергосбережения. Математическое моделирование в настоящее время является одним из наиболее востребованных способов предсказания поведения объекта в зависимости от действия граничных условий. Поэтому в диссертации для оценки изменения параметров внутренней среды помещения при реализации энергосберегающих мероприятий был использован метод математического моделирования процессов теплообмена при формировании микроклимата в здании.

3.1 Математическая модель процессов теплообмена в помещении здания с естественной вентиляцией

Математическое описание процессов теплообмена в помещениях здания изложено в ряде статей, монографий и учебных пособий, например [4, 32, 35, 36, 38, 40, 78, 108, 137]. В помещениях для умственной работы людей (административные здания, учебные заведения) и проживания людей (жилые здания) протекают весьма сложные процессы конвективного, кондуктивного и радиационного теплообмена, а также процессы молекулярной и конвективной диффузии загрязняющих воздух веществ. Дифференциальные уравнения конвективного переноса теплоты и массы аналогичны по форме записи. Дифференциальное уравнение переноса лучистой энергии по форме отлично от дифференциального уравнения конвективного теплообмена из-за особенностей радиационного теплообмена.

Математическая модель формирования микроклимата в помещении здания включает в себя: уравнение переноса импульса, уравнение неразрывности, урав-

нения переноса энергии за счет радиационного и конвективного теплообмена и уравнение переноса массы i -ого компонента смеси.

Допущения, принятые при записи дифференциальных уравнений:

1) воздушная среда в помещении представляет собой четырех компонентную смесь, состоящую из азота (N_2), кислорода (O_2), углекислого газа (CO_2) и водяного пара (H_2O);

2) компоненты газовой смеси и сама смесь подчиняются законам идеального газа;

3) газовая смесь в помещении является недиатермичной средой, т.е. излучает и поглощает энергию;

4) диффузионный перенос воздуха через твердые элементы ограждающих конструкций (стены, полотно оконного блока) отсутствует;

5) приток воздуха в помещение осуществляется через щелевой канал по периметру оконного блока (оконных блоков);

6) инверсия воздушного потока в приточных отверстиях отсутствует;

7) выход потока воздуха из помещения осуществляется через вентиляционные каналы и щелевое отверстие по периметру дверного блока (дверных блоков).

С учетом принятых допущений математическая модель тепломассообмена в помещении непроизводственного здания принимает вид:

1. Уравнение переноса импульса:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \rho \vec{w} + \nabla(\rho \vec{w}_i \vec{w}_j) = -\nabla p + \nabla \rho \nu \nabla \vec{w} + \rho \vec{g}; \quad (3.1)$$

2. Уравнение переноса энергии:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \rho E + \nabla[\vec{w}(\rho E + p)] = \nabla(\lambda_{eff} \nabla T - \sum_{i=1}^n h_i \vec{J}_i + \rho \nu \nabla \vec{w}_i \vec{w}_j) + S_h. \quad (3.2)$$

3. Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \rho + \nabla(\rho \vec{w}) = 0; \quad (3.3)$$

4. Уравнение переноса i -ого компонента смеси:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \rho C_i + \nabla(\rho \vec{w} C_i) = -\nabla \vec{J}_i + S_i. \quad (3.4)$$

В уравнениях (3.1) – (3.4):

τ – время, с;

ρ – плотность газовой смеси, кг/м³;

\vec{w} – скорость движения воздуха, м/с;

C_i – локальная массовая концентрация i -ого компонента смеси, кг/кг;

S_i – источникный член уравнения для i -ого компонента смеси, кг/(с·м³);

p – давление, Па;

ν – кинематический коэффициент вязкости, м²/с;

$\rho \nu \nabla \vec{w}$ – тензор вязкой диссипации, кг/(м·с²):

$$\rho \nu \nabla \vec{w} = \rho \nu_{eff} \left[\left(\nabla \vec{w} + \nabla \vec{w}^t \right) - \frac{2}{3} \nabla \vec{w} \delta \right], \quad (3.5)$$

где ν_{eff} – кинематический коэффициент эффективной вязкости газовой смеси, м²/с;

λ_{eff} – эффективный коэффициент теплопроводности газовой смеси, Вт/(м·°С);

\vec{w}^t – пульсация скорости потока смеси, м/с;

δ – единичный тензор (символ Кронекера);

E – удельная внутренняя энергия газовой смеси, Дж/кг;

\vec{g} – ускорение свободного падения, м/с²;

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{w^2}{2}, \quad (3.6)$$

где h – удельная энтальпия газовой смеси, Дж/кг, равна для смеси идеальных газов

$$h = \sum_{i=1}^n C_i h_i, \quad (3.7)$$

где h_i – удельная энтальпия i -ого компонента смеси, Дж/кг:

$$h_i = \int_{T_0}^T c_{p,i} dT, \quad (3.8)$$

где T_0 – значение базовой температуры, К, определяется выбранным при реализации математической модели методом решения;

$c_{p,i}$ – удельная массовая изобарная теплоемкость газовой смеси, Дж/(кг·К);

S_h – источниковый член уравнения, характеризующий действие источников теплоты внутри расчетной области, Вт/м³;

\vec{J}_i – плотность диффузионного потока i -ого компонента смеси, кг/(с·м²). Для турбулентного потока среды с использованием закона Фика:

$$J_i = - \left(\rho D_{i,m} + \frac{\rho v_t}{Sc_t} \right) \nabla C_i, \quad (3.9)$$

где $D_{i,m}$ – коэффициент диффузии i -ого компонента смеси, м²/с;

Sc_t – турбулентный критерий Шмидта:

$$Sc_t = \frac{v_t}{D_t}, \quad (3.10)$$

где v_t – кинематический коэффициент турбулентной вязкости смеси, м²/с;

D_t – коэффициент турбулентной диффузии, м²/с;

T – температура, К.

Для описания турбулентных свойств газовой смеси была применена k - ε модель турбулентности, предложенная в 1945 г. Чоу [6, 133] развитая в последствии в работах Лаундера Джонса (1972 г.) [6, 136, 150]. Литературные источники [1, 36, 49, 93] показывают, что для расчета течения газа в большом объеме k - ε модель турбулентности является наиболее приемлемой моделью, так как она не требует значительных вычислительных ресурсов [136] и показывает хорошую точность при расчете процессов конвективного теплообмена в помещениях. Для смеси газов записывают уравнения переноса кинетической энергии турбулентности k и диссипации кинетической энергии ε в следующем виде:

– уравнение переноса кинетической энергии турбулентности (k):

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla(\rho \vec{w}k) &= \nabla \left[\left(\rho v + \frac{\rho v_t}{Pr_k} \right) \nabla k \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon; \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \nabla(\rho \vec{w}\varepsilon) &= \nabla \left[\left(\rho v + \frac{\rho v_t}{Pr_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k - C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \end{aligned} \quad (3.11)$$

В системе уравнений (3.11):

v_t – кинематический коэффициент турбулентной вязкости газовой смеси, м²/с:

$$v_t = C_v \frac{k^2}{\varepsilon}; \quad (3.12)$$

G_k – источник турбулентной кинетической энергии:

$$G_k = \rho v_t \left(\nabla \vec{w} + \nabla \vec{w}^t \right); \quad (3.13)$$

G_b – источник турбулентной кинетической энергии, возникающий за счет воздействия на поток гравитационной силы, который учитывается при наличии в расчетной области гравитации и ненулевого градиента температуры. Для идеального газа:

$$G_b = -g \frac{v_t}{Pr_t} \nabla \rho, \quad (3.14)$$

где Pr_t – турбулентное число Прандтля.

Экспериментально полученные значения констант k – ε модели турбулентности приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Значения констант модели турбулентности

$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	$C_{3\varepsilon}$	C_v	Pr_ε	Pr_k	Pr_t
1,44	1,92	1,2	0,09	1	1,3	1

Для k – ε модели турбулентности эффективный коэффициент теплопроводности рассчитывают по формуле:

$$\lambda_{eff} = \lambda + \lambda_t; \quad (3.15)$$

$$\lambda_t = \frac{c_p \rho v_t}{Pr_t},$$

где λ и λ_t – соответственно физический и турбулентный коэффициент теплопроводности газовой смеси, Вт/(м·К).

Граничные условия для k - ε модели турбулентности для вязкого слоя пристеночного течения в области равного порождения и диссипации кинетической энергии турбулентности имеют вид:

$$k|_w = 0; \quad \varepsilon|_w = \nu \frac{\partial^2 k}{\partial n^2}. \quad (3.16)$$

Величину лучистого теплового потока находят путем решения дифференциального уравнения вида:

$$\frac{dI(\vec{r}, \vec{s})}{ds} + (A + \sigma_s)I(\vec{r}, \vec{s}) = An^2 \frac{\sigma_0 T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s}' \cdot \vec{s}) d\Omega', \quad (3.17)$$

где \vec{r} – радиус-вектор;

\vec{s} – единичный вектор в направлении рассеяния;

\vec{s}' – единичный вектор в направлении падающего излучения;

A – коэффициент поглощения;

n – показатель преломления среды;

σ_s – коэффициент рассеяния;

σ_0 – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м²·К⁴);

I – яркость излучения в данной точке (\vec{r}) в данном направлении (\vec{s}), Вт/(м²·ср);

T – локальная температура, К;

Φ – фазовая функция;

Ω – телесный угол, ср.

В правой части уравнения (3.17) первое слагаемое показывает ослабление интенсивности излучения в направлении \vec{s} при ее поглощении и рассеивании; второе слагаемое показывает усиление интенсивности излучения за счет излу-

ния среды; третье – учитывает вклад радиационной энергии за счет рассеяния излучения [63].

Плотность потока энергии излучения определяется по формуле

$$E(\vec{r}) = \int_{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}) d\Omega. \quad (3.18)$$

При учете радиационного теплообмена уравнение сохранения энергии должно быть дополнено источниковым членом q_w :

$$q_w = A(E_0(r) - E(r)), \quad (3.19)$$

где E_0 – плотность потока излучения абсолютно черного тела (АЧТ).

При радиационном теплообмене в помещении здания показатель преломления среды (воздуха) $n = 1$, а фазовая функция, учитывающая анизотропное рассеивание, $\Phi(\vec{s}' \cdot \vec{s}) = 1$. Ограждающие поверхности приняты диффузионными серыми телами. С учетом этого уравнение (3.16) можно записать в виде:

$$\frac{dI(\vec{r}, \vec{s})}{ds} + (A + \sigma_s)I(\vec{r}, \vec{s}) = A \frac{\sigma_0 T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') d\Omega'. \quad (3.20)$$

При реализации математической модели микроклимата в качестве метода расчета радиационного теплопереноса принят метод дискретных ординат (Discrete Ordinats (DO)) [47, 138].

При реализации DO-метода было учтено, что:

– падающее на поверхность радиационное излучение равно

$$q_{nad} = \int_{\vec{s} \cdot \vec{n} > 0} I_{nad} \cdot \vec{s} \cdot \vec{n} d\Omega. \quad (3.21)$$

– максимальное значение интенсивности излучения для всех направлений излучения \vec{s} для абсолютно черного тела (АЧТ) равно

$$I_0 = \frac{q_{эфф.}}{\pi}. \quad (3.22)$$

– собственное излучение поверхности стены равно

$$q_{соб.} = \varepsilon_w \sigma_0 T_w^4; \quad (3.23)$$

– плотность отраженного лучистого теплового потока

$$q_{\text{отр.}} = (1 - \varepsilon_w) q_{\text{над.}}; \quad (3.24)$$

– плотность лучистого теплового потока, поглощенного твердой поверхностью

$$q_{\text{погл.}} = \varepsilon_w q_{\text{над.}}, \quad (3.25)$$

где $q_{\text{над.}}$ – плотность лучистого теплового потока, падающего на непрозрачную поверхность помещения, Вт/м²;

ε_w – интегральная степень черноты поверхности;

σ_0 – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м²·К⁴);

T_w – температура поверхности, К.

Уходящий с поверхности и результирующий радиационные тепловые потоки рассчитываются с учетом (3.21 – 3.25) по выражениям

$$q_{\text{эфф.}} = q_{\text{отр.}} + E_w = (1 - \varepsilon_w) q_{\text{над.}} + \varepsilon_w \sigma_0 T_w^4; \quad (3.26)$$

$$q_{\text{рез.}} = q_{\text{погл.}} - q_{\text{соб.}} = q_{\text{над.}} - q_{\text{эфф.}}. \quad (3.27)$$

Зададим граничные условия (ГУ) для системы уравнений (3.1) – (3.4) и (3.20) на границах помещения (рисунок 3.1) с координатами $x = 0$, $y = 0$, $z = 0$, $x = A$, $y = B$, $z = C$.

Скорость воздушного потока на непроницаемых твердых границах помещения равна нулю: $w_{m,w}(\tau) = 0$ м/с. Температура поверхности ограждающих конструкций определяется экспериментально и не изменяется в ходе расчета: $T_w = \text{const}$. Температура поверхности источников тепловой энергии (отопительных приборов, людей в помещении) определяется экспериментально и не изменяется в ходе расчета ($T_{w,q} = \text{const}$).

Граничные условия для решения сопряженной задачи теплообмена у поверхности твердых стен помещения имеют вид:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_w = \lambda_w \frac{\partial T_w}{\partial n} \Big|_w, \quad (3.28)$$

где λ – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·°С);

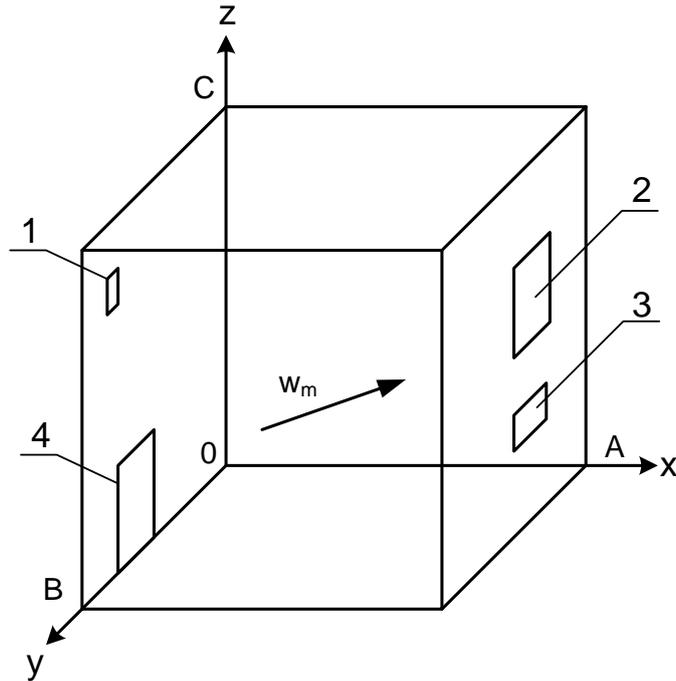


Рисунок 3.1 – Геометрическая модель помещения: 1 – вентиляционное отверстие, 2 – окно; 3 – отопительный прибор; 4 – дверь

λ_w – коэффициент теплопроводности материала твердой поверхности, Вт/(м·°С);

T_w – температура твердой поверхности, °С.

Для решения уравнения переноса лучистой энергии (3.20) кроме температуры ограждающих поверхностей задается их интегральная степень черноты по справочным данным [18]. Излучательные свойства смеси газов в помещении (коэффициент рассеяния, коэффициент поглощения и т.д.) рассчитываются на основе величины объемных долей отдельных компонентов.

На границах помещения, являющихся воздухопроницаемыми поверхностями (вентиляционные отверстия, окна, двери), скорость воздушного потока рассчитывается, исходя из известного значения воздухообмена, которое либо определяется экспериментально (см. раздел 3.3 настоящей работы), либо принимается равным требуемому воздухообмену по санитарно-эпидемиологическим нормам [100]:

$$w_m = \frac{L_\phi}{f}, \quad (3.26)$$

где L_ϕ – фактический воздухообмен помещения, м³/с;

f – площадь воздухопроницаемых элементов ограждающих конструкций, через которые осуществляется приток/отток воздуха, м².

Температуру на воздухопроницаемых границах помещения задавали следующим образом:

– $T_m = T_n$ – на границе входа воздушного потока в помещение температура потока газовой смеси равна температуре наружного воздуха;

– $T_m = f(T_n, T_w, T_{w,q}, w, \tau)$ – на границе выхода воздушного потока из помещения.

Начальные условия для решения системы уравнений (3.1) – (3.4) и (3.20) задавали по результатам экспериментального исследования моделируемого объекта, в рамках которого были измерены температуры поверхностей объекта, температура воздуха, относительная влажность и подвижность внутреннего и наружного воздуха.

Источниками тепловой энергии, влаги и углекислого газа для помещений жилых, общественных и административных здания являются находящиеся в помещении люди, отопительные приборы и бытовая техника. Состав газовой смеси помещения, вдыхаемой и выдыхаемой человеком принята по экспериментальным данным в соответствии с [58, 123] (таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Состав газовой смеси в помещении

Газовая смесь	Состав газовой смеси, %			
	N ₂	O ₂	CO ₂	H ₂ O
Воздух в помещении	78	20,755	0,035	1,23
Приточный воздух	78	20,755	0,035	1,23
Воздух, выдыхаемый человеком	78,5	14,21	3,6	3,69

Для проверки обоснованности допущений, принятых при математической формулировке задачи расчета тепломассообмена в помещении здания, было вы-

полнено сравнение результатов численного моделирования микроклимата с экспериментальными данными.

3.2 Экспериментальное определение характеристик внутренней среды помещений при различных типах источников теплоты

Для получения информации о факторах, влияющих на формирование микроклимата зданий, были выполнены измерения основных параметров внутренней среды помещения: температуры, относительной влажности, подвижности и давления воздуха в помещении, а также измерения температуры, скорости и давления наружного воздуха, температур ограждающих конструкций для разных установленных в помещении источников теплоты.

Планы и геометрические модели экспериментальных помещений с указанием мест установки измерительного оборудования приведены на рисунках 3.2 и 3.3. Внешний вид помещений показан на рисунках 3.4 и 3.5.

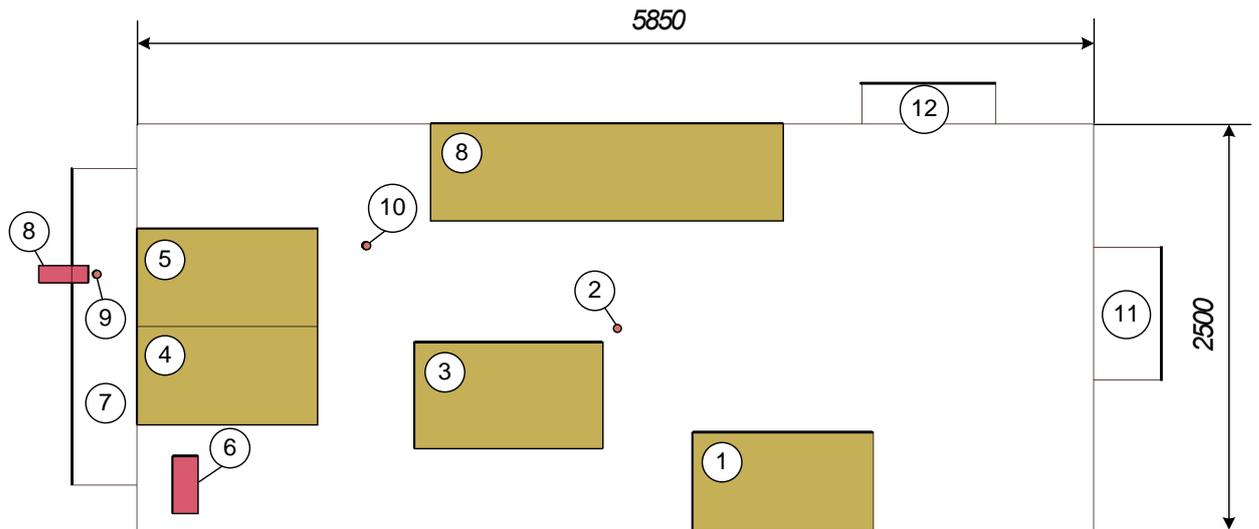
При проведении экспериментов использовались локальные источники тепловой энергии (теповентилятор, масляный радиатор), обеспечивающие возможность регулирования тепловой нагрузки помещения. Эксперименты выполнены в период, когда централизованная система отопления не функционировала.

Экспериментальные исследования по определению параметров микроклимата в аудитории А-318 ИГЭУ выполнены при следующих условиях:

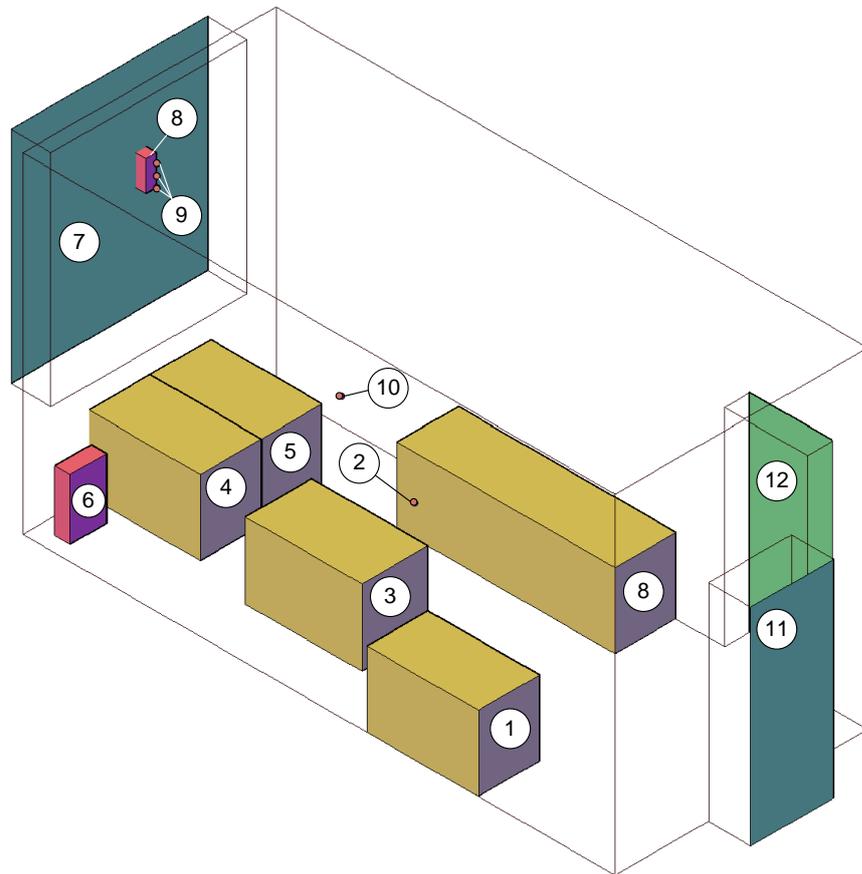
1) отопление помещения при помощи тепловентилятора, герметично установленного в проеме оконного блока. При этом поддерживалась постоянная температура и скорость поступающего в помещение воздушного потока.

2) отопление помещения при помощи масляного радиатора. При этом поддерживалась постоянная температура поверхности радиатора.

Места установки отопительных приборов указаны на рисунке 3.2.



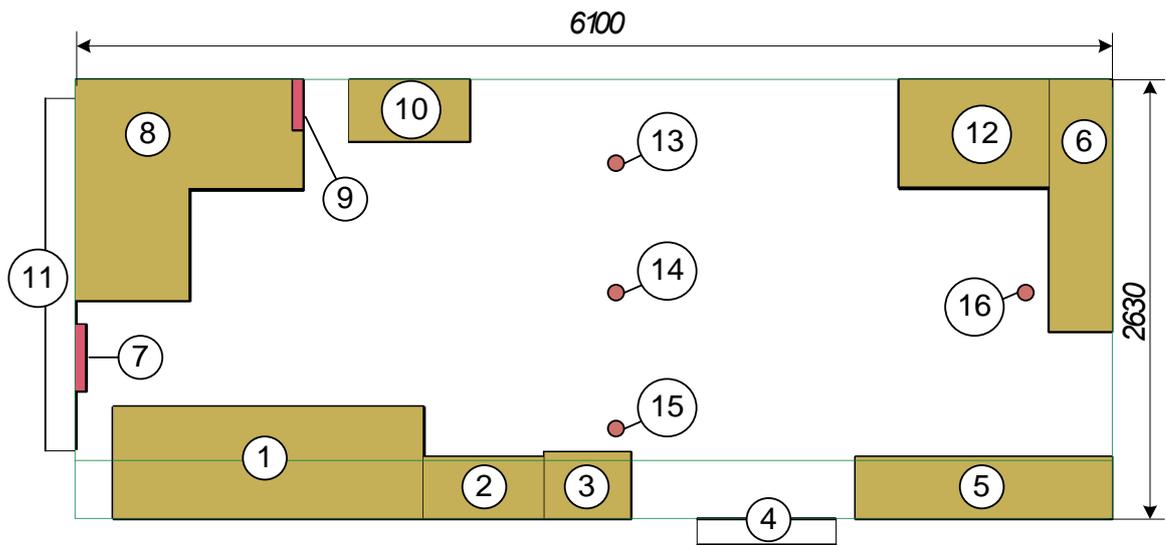
а) План аудитории



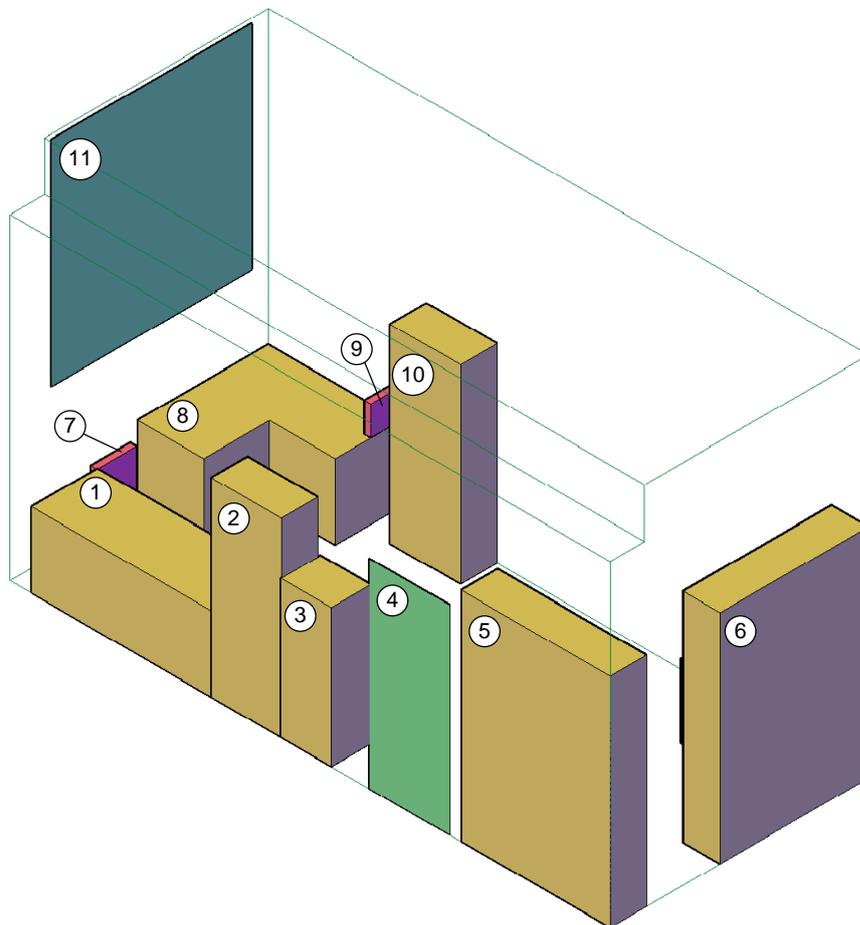
б) Геометрическая модель аудитории

Рисунок 3.2 – План и геометрическая модель аудитории А-318 ИГЭУ:

1, 8 – стол; 2, 10 – датчики для измерения параметров воздуха в помещении; 3, 4, 5 – рабочий стол; 6 – отопительный прибор (масляный радиатор); 7 – окно; 8 – отопительный прибор (тепловентилятор); 9 – датчик для измерения параметров приточного воздуха; 11, 12 – дверь



а) План аудитории



б) Геометрическая модель аудитории

Рисунок 3.3 – План и геометрическая модель экспериментального помещения (А-316к):

1 – рабочий стол; 2 – шкаф; 3 – сейф; 4 – входная дверь; 5,6 – стеллаж; 7 – отопительный прибор (масляный радиатор); 8 – рабочий стол; 9 – отопительный прибор (тепловентилятор); 10 – шкаф; 11 – окно; 12 – стол; 13, 14, 15 – место установки измерительных приборов

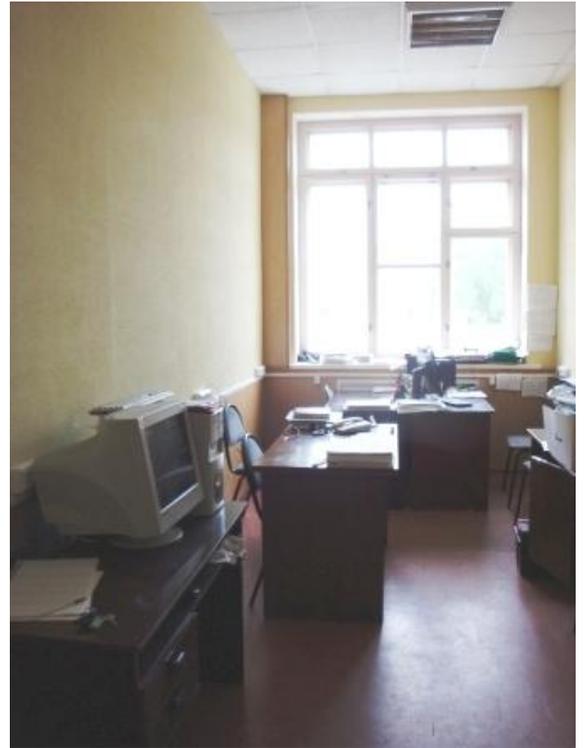


Рисунок 3.4 – Внешний вид экспериментального помещения (А-318)



Рисунок 3.5 – Внешний вид экспериментального помещения (А-316к)

Условия проведения эксперимента № 1 (отопление помещения А-318 тепловентилятором) представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Условия проведения эксперимента № 1 при отоплении аудитории А-318 тепловентилятором

Наименование параметра		Обозначение, размерность	Значение
Параметры окружающей среды	температура воздуха	$T_{oc}, ^\circ C$	25,3
	относительная влажность воздуха	$\varphi_{oc}, \%$	60
	подвижность воздуха	$w_{oc}, м/с$	3
	абсолютное давление	$p, кПа (мм рт. ст.)$	99,3 (745)
Параметры воздуха в помещении	температура воздуха	$T_{в}, ^\circ C$	28,3
	относительная влажность воздуха	$\varphi, \%$	51
	подвижность воздуха	$w, м/с$	0,01
Средняя температура ограждающих поверхностей	фронтальная	$T_{w1}, ^\circ C$	28
	тыловая	$T_{w2}, ^\circ C$	27,8
	левая	$T_{w3}, ^\circ C$	28,3
	правая	$T_{w4}, ^\circ C$	28,3
	нижняя (пол)	$T_{w5}, ^\circ C$	28,3
	верхняя (потолок)	$T_{w6}, ^\circ C$	28,4
Параметры приточного воздуха	температура воздуха после тепловентилятора	$T_{п}, ^\circ C$	75
	подвижность воздуха	$w_{п}, м/с$	3

Измерение температур ограждающих поверхностей выполнялось в центре соответствующей поверхности [27] при помощи пирометра Thermopoint TPT 64P.

Измерение параметров внутренней среды выполнялись метеометром МЭС-200А каждые 10 мин. в точке 2 (рис. 3.2), расположенной в центре обслуживаемой зоны помещения, на высоте 0,1, 0,6 и 1,7 от поверхности пола (для помещений, в которых люди преимущественно пребывают в сидячем положении) [27]. Параметры приточного воздуха контролировались в точке 9 (рис. 3.2) каждые 20 мин. На рисунках 3.6 – 3.8 приведены значения средней температуры воздуха в точке измерения, средней относительной влажности и средней подвижности в течение эксперимента.

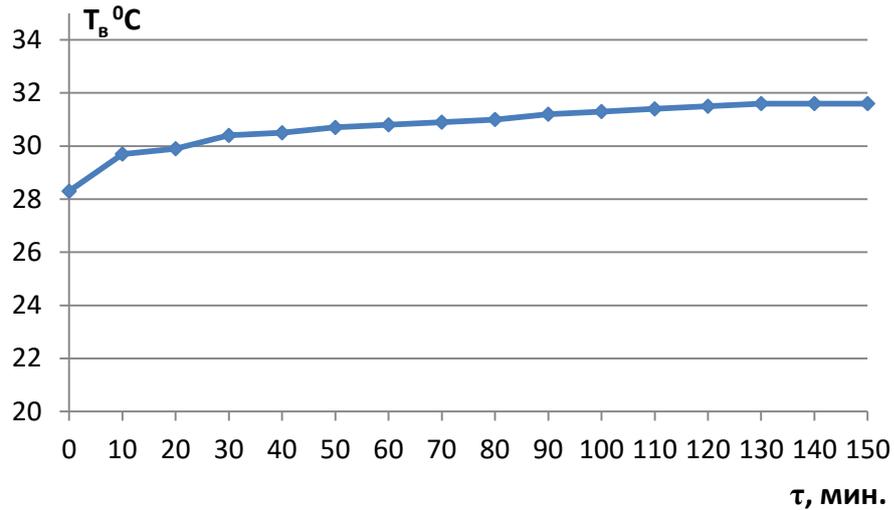


Рисунок 3.6 – Температура воздуха в точке 2 (рис. 3.2) в ходе эксперимента при отоплении тепловентилятором (эксперимент № 1)

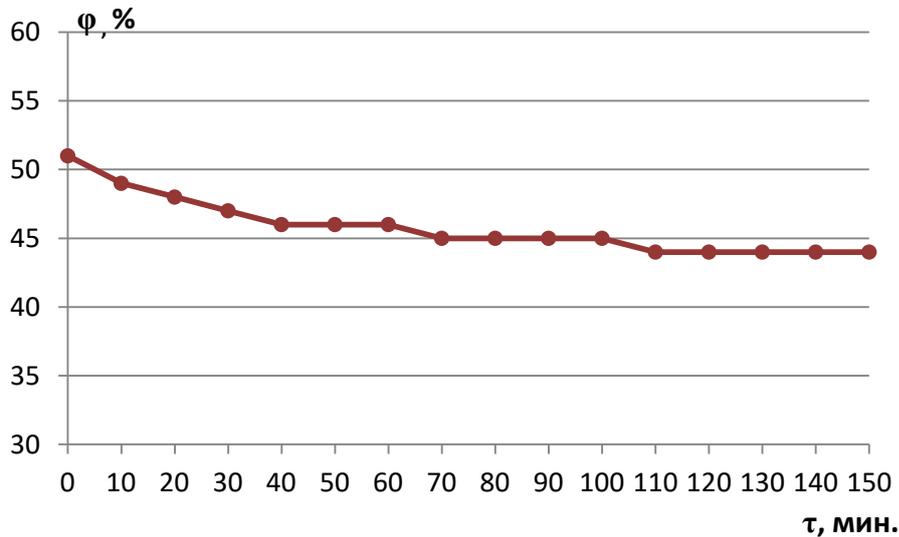


Рисунок 3.7 – Относительная влажность воздуха в точке 2 (рис. 3.2) в ходе эксперимента при отоплении вентилятором (эксперимент № 1)

При проведении эксперимента режим теплового равновесия наступил через 2 ч 10 мин. после начала наблюдений. При этом средняя температура воздуха в контрольной точке 2 (рис. 3.2) составила $31,6^{\circ}\text{C}$, относительная влажность воздуха – 44%, подвижность воздуха – 0,06 м/с.

Условия проведения эксперимента № 2 (отопление помещения А-318 масляным радиатором) представлены в таблице 3.4.

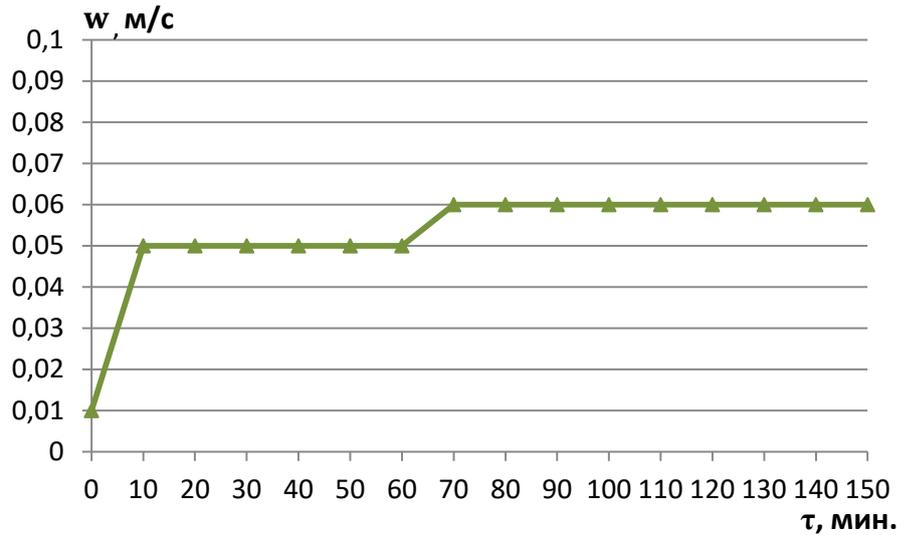


Рисунок 3.8 – Подвижность воздуха в точке 2 (рис. 3.2) в ходе эксперимента при отоплении вентилятором (эксперимент № 1)

Таблица 3.4 – Условия проведения эксперимента № 2 при отоплении аудитории А-318 масляным радиатором

Наименование параметра		Обозначение, размерность	Значение
Параметры окружающей среды	температура воздуха	$T_{oc}, ^\circ C$	25,5
	относительная влажность воздуха	$\varphi_{oc}, \%$	62
	подвижность воздуха	$w_{oc}, м/с$	0,3
	абсолютное давление	$p, кПа (мм рт. ст.)$	99,3 (745)
Параметры воздуха в помещении	температура воздуха	$T_b, ^\circ C$	26,2
	относительная влажность воздуха	$\varphi, \%$	61
	подвижность воздуха	$w, м/с$	0
Средняя температура ограждающих поверхностей	фронтальная	$T_{w1}, ^\circ C$	27,5
	тыловая	$T_{w2}, ^\circ C$	27,5
	левая	$T_{w3}, ^\circ C$	26,3
	правая	$T_{w4}, ^\circ C$	26,3
	нижняя (пол)	$T_{w5}, ^\circ C$	27,6
	верхняя (потолок)	$T_{w6}, ^\circ C$	26,5
Средняя температура поверхности отопительного прибора		$T_{оп}, ^\circ C$	64

Измерения параметров внутренней среды выполнены метеометром МЭС-200А и Testo-425 каждые 10 мин. в точке 2 (рис. 3.2), расположенной в центре обслуживаемой зоны помещения, и в точке 10 (рис. 3.2), расположенной на расстоянии 0,5 м от ограждающей поверхности помещения, на высоте 0,1, 0,6 и 1,7 от по-

верхности пола (согласно ГОСТ 30494 [27], для помещений, в которых люди преимущественно пребывают в сидячем положении). Температуру поверхности масляного радиатора измеряли пирометром Thermopoint TPT 64P в девяти точках и рассчитывали среднюю температуру поверхности.

На рисунках 3.9 – 3.11 приведены значения средней температуры воздуха в точках 2 и 10 (рис. 3.2), значения средней относительной влажности (в точке 2, рис. 3.2) и средней подвижности воздуха (в точках 2 и 10, рис. 3.2) в течение эксперимента.

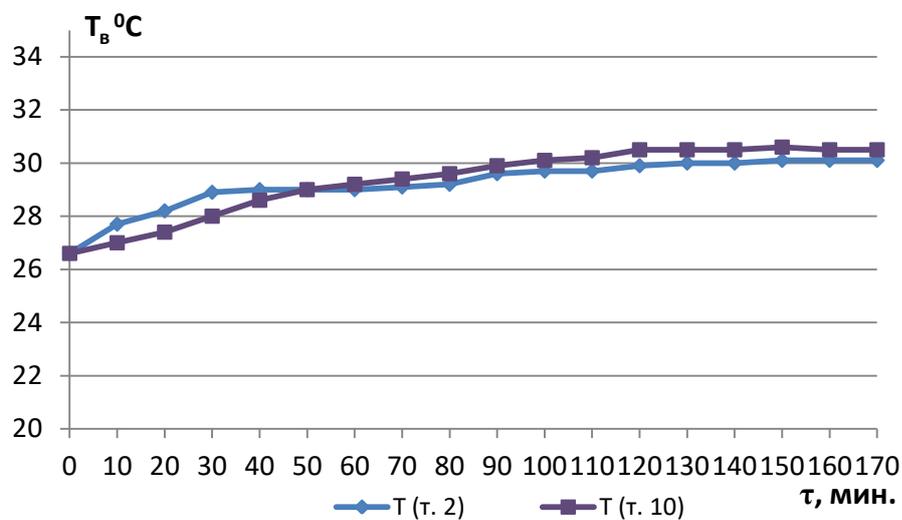


Рисунок 3.9 – Температура воздуха в точках 2 и 10 (рис. 3.2) ходе эксперимента при отоплении масляным радиатором (эксперимент № 2)

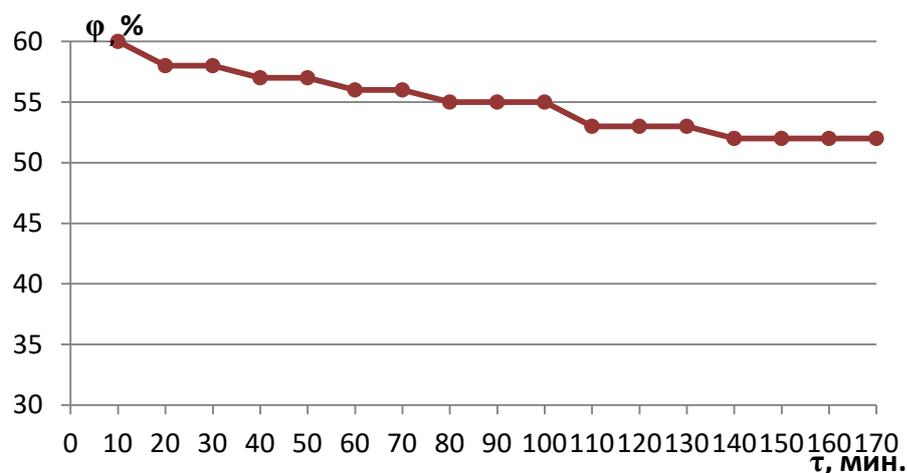


Рисунок 3.10 – Относительная влажность воздуха в точках 2 и 10 (рис. 3.2) ходе эксперимента при отоплении масляным радиатором (эксперимент № 2)

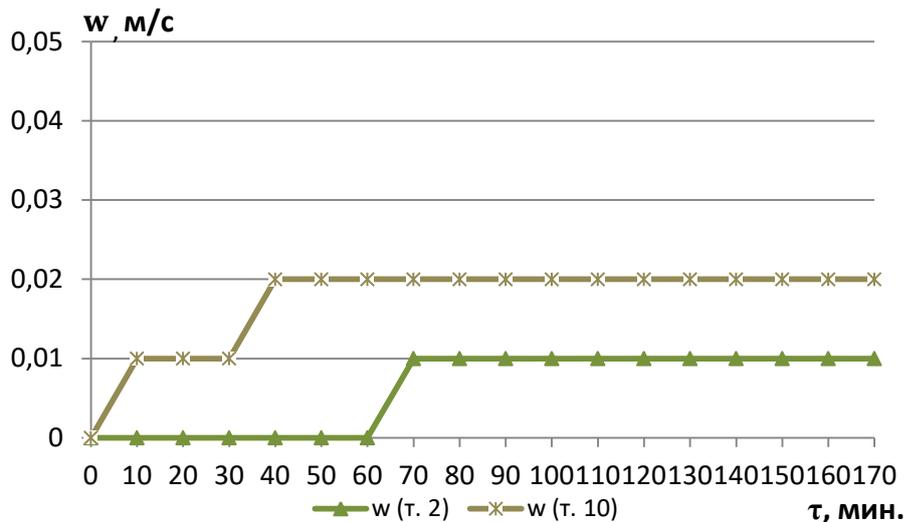


Рисунок 3.11 – Подвижность воздуха в точках 2 и 10 (рис. 3.2) ходе эксперимента при отоплении масляным радиатором (эксперимент № 2)

При проведении эксперимента режим теплового равновесия наступил через 2 ч 50 мин. после начала наблюдений. При этом средняя температура воздуха в контрольной точке 2 (рис. 3.2) составила $30,1^{\circ}\text{C}$, относительная влажность воздуха – 52%, подвижность воздуха – 0,01 м/с. Средняя температура воздуха в контрольной точке 10 (рис. 3.2) составила $30,5^{\circ}\text{C}$, а подвижность воздуха – 0,02 м/с.

Условия проведения эксперимента № 3 (отопление помещения А-316к масляным радиатором) приведены в таблице 3.5.

Измерения параметров внутренней среды выполнены метеометром МЭС-200А, термоанемометром Testo-425 и измерителем плотности тепловых потоков ИТП-МГ4.03/Х(У)“ПОТОК” каждые 10 мин. в четырех точках: в центре обслуживаемой зоны помещения в точке 1 (14, рис. 3.3), на расстоянии 0,5 м от левой стены в точке 2 (15, рис. 3.3), на расстоянии 0,5 м от правой стены в точке 3 (13, рис. 3.3) и фронтальной стены в точке 4 (16, рис. 3.3) – на высоте 0,1, 0,6 и 1,7 от поверхности пола (для помещений, в которых люди преимущественно пребывают в сидячем положении) [27].

Температуру поверхности масляного радиатора измеряли пирометром Thermopoint ТРТ 64Р в девяти точках, по которым и рассчитывали среднюю температуру.

Таблица 3.5 – Условия проведения эксперимента при отоплении аудитории А-316к масляным радиатором

Наименование параметра		Обозначение, размерность	Значение
Параметры окружающей среды	температура воздуха	$T_{oc}, ^\circ C$	12,5
	относительная влажность воздуха	$\varphi_{oc}, \%$	70
	подвижность воздуха	$w_{oc}, м/с$	1,5
	абсолютное давление	$p, кПа (мм рт. ст.)$	99,3 (744)
Параметры воздуха в помещении	температура воздуха	$T_{в}, ^\circ C$	18,3
	относительная влажность воздуха	$\varphi, \%$	52
	подвижность воздуха	$w, м/с$	0,1
Температура ограждающих поверхностей	фронтальная	$T_{w1}, ^\circ C$	18,4
	тыловая	$T_{w2}, ^\circ C$	17,3
	левая	$T_{w3}, ^\circ C$	18,0
	правая	$T_{w4}, ^\circ C$	18,0
	нижняя (пол)	$T_{w5}, ^\circ C$	17,8
	верхняя (потолок)	$T_{w6}, ^\circ C$	18
Средняя температура поверхности отопительного прибора		$T_{оп}, ^\circ C$	65

На рисунках 3.12 – 3.15 приведены значения температуры воздуха, измеренных в четырех точках обслуживаемой зоны, и относительной влажности воздуха, измеренной в точке 4 (16, рис. 3.3). Подвижность воздуха измерялась в точке 3 (13, рис. 3.3) и в точке 4 (16, рис. 3.3) на высоте 0,1, 0,6 и 1,7 от поверхности пола и на протяжении эксперимента не изменялась и составила в среднем 0,1 м/с.

При проведении эксперимента режим теплового равновесия наступил через 3 ч 40 мин. после начала наблюдений. При этом средняя температура воздуха в точке 14 (рис. 3.3) составила 20,4 $^\circ C$, относительная влажность воздуха – 48%, подвижность воздуха – 0,1 м/с. Средняя температура воздуха в точке, отстоящей от левой стены на расстояние 0,5 м (точка 15, рис. 3.3) составила 20,5 $^\circ C$, от правой стены на расстояние 0,5 м (точка 13, рис. 3.3) – 20,9 $^\circ C$, от фронтальной стены на расстояние 0,5 м – 21,3 $^\circ C$ (точка 16, рис. 3.3).

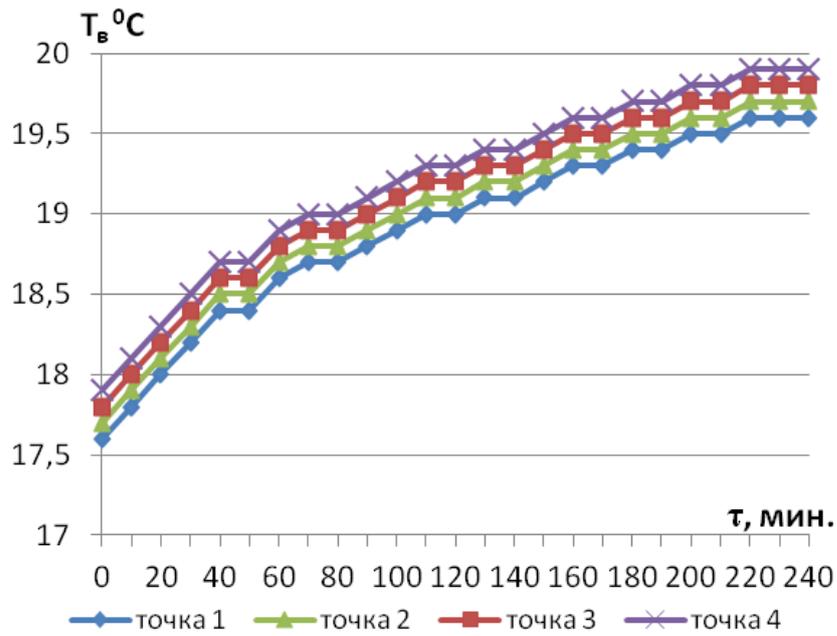


Рисунок 3.12 – Температура воздуха в точках 1 – 4 на высоте 0,1 м от поверхности пола в ходе эксперимента при отоплении масляным радиатором (эксперимент № 3)

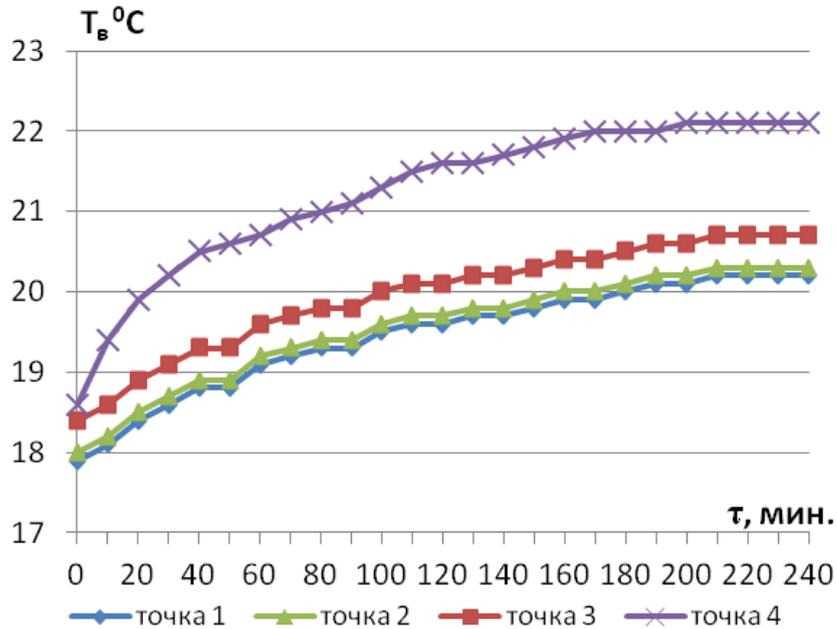


Рисунок 3.13 – Температура воздуха в точках 1 – 4 на высоте 0,6 м от поверхности пола в ходе эксперимента при отоплении масляным радиатором (эксперимент № 3)

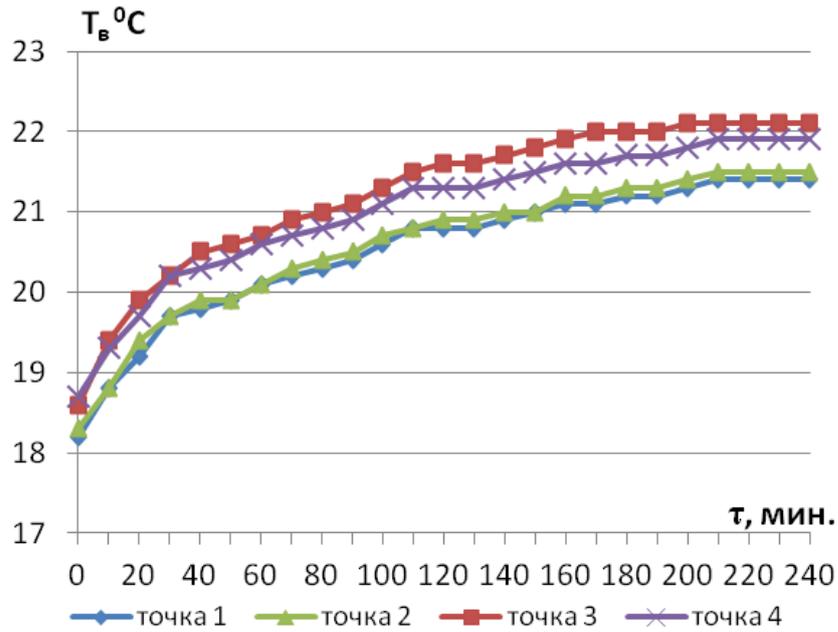


Рисунок 3.14 – Температура воздуха в точках 1 – 4 на высоте 1,7 м от поверхности пола в ходе эксперимента при отоплении масляным радиатором (эксперимент № 3)

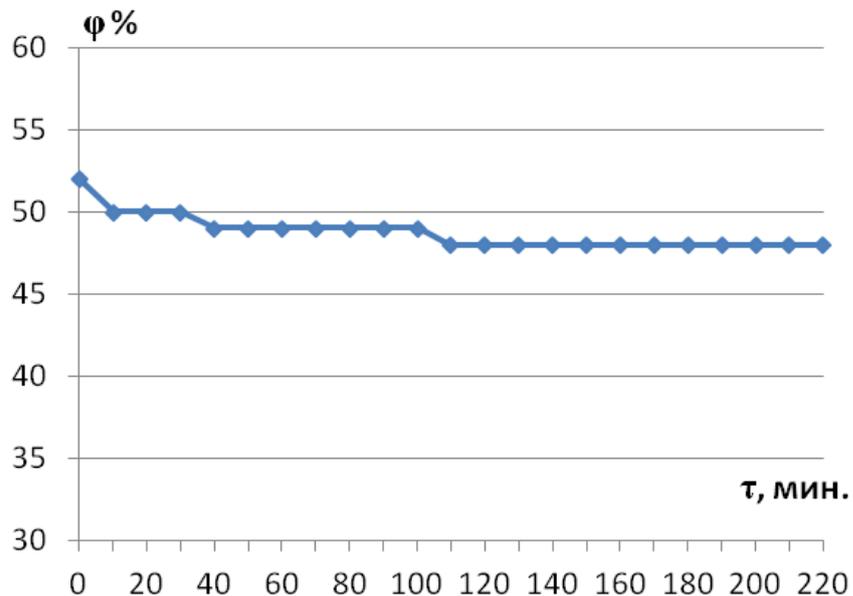


Рисунок 3.15 – Относительная влажность воздуха в точке 4 на высоте 1,6 м от поверхности пола в ходе эксперимента при отоплении масляным радиатором (эксперимент № 3)

3.3 Определение фактического воздухообмена помещений

Требуемый воздухообмен помещений определяется на этапе проектирования здания по из санитарно-эпидемиологическим нормам [90, 100] и требованиям энергосбережения [96, 98]. Однако некачественный монтаж элементов ограждающих конструкций, а также возможная реконструкция для улучшения эксплуатационных характеристик объекта, в том числе в целях энергосбережения, может привести к отклонению фактического воздухообмена помещений от нормируемых значений. Сверхнормативный воздухообмен в зданиях требует дополнительных затрат тепловой энергии на нагрев холодного инфильтрационного воздуха в холодный период года. Недостаточный воздухообмен в зданиях с естественной вентиляцией приводит к снижению качества воздуха (накоплению углекислого газа и прочих примесей), что отрицательно сказывается на самочувствии и работоспособности человека.

Измерение фактического воздухообмена помещений зданий с естественной вентиляцией основано на определении воздухопроницаемости ограждающих конструкций. Фактический воздухообмен помещений, определенный экспериментально, сравнивают с санитарно-эпидемиологическими требованиями [100] и нормами в области энергосбережения [96].

Согласно санитарно-эпидемиологическим требованиям [100], кратность воздухообмена для общественных и административных зданий задают с учетом назначения помещения, а минимально допустимый приток воздуха определяют по количеству мест в помещении (для работников, посетителей, обучающихся и т.д.), и он не должен быть менее $20 \text{ м}^3/\text{место}$. Исключением являются спортивные объекты, для которых должен быть обеспечен приток свежего воздуха в объеме минимум 80 м^3 на одного занимающегося.

Таким образом, минимальный приток воздуха с точки зрения санитарно-эпидемиологических норм рассчитывают по выражению

$$L^c = N \cdot l_n, \quad (3.26)$$

где N – количество мест в помещении;

l_n – минимальный приток воздуха на 1 место.

Минимально допустимая кратность воздухообмена помещения определяется по формуле

$$n_c = \frac{L^c}{V}, \quad (3.27)$$

где L^c – минимально допустимый расход приточного воздуха, м³/ч;

V – объем воздуха в помещении, м³ (принимают равным объему помещения).

Все помещения с точки зрения СП 23-101-2004 «Проектирование тепловой защиты зданий» [96], в котором приведены требования к теплозащитным характеристикам зданий, в зависимости от кратности воздухообмена можно разделить на несколько классов (таблица 3.6).

Таблица 3.6 – Класс воздухопроницаемости ограждающих конструкций объекта [96]

Кратность воздухообмена при $\Delta p = 50$ Па ($n_{50}, \text{ч}^{-1}$)	Наименование класса	Кратность воздухообмена при $\Delta p = 50$ Па ($n_{50}, \text{ч}^{-1}$)	Наименование класса
$n_{50} < 1$	очень низкая	$4 \leq n_{50} < 6$	умеренная
$1 \leq n_{50} < 2$	низкая	$6 \leq n_{50} < 10$	высокая
$2 \leq n_{50} < 4$	нормальная	$10 \leq n_{50}$	очень высокая

Кратность воздухообмена n_{50} определяют экспериментально по методике, изложенной в ГОСТ 31167 [28] при разности давлений внутреннего и наружного воздуха $\Delta p = 50$ Па. При этом помещения с классом воздухопроницаемости «умеренная», «высокая» и «очень высокая» могут быть признаны энергетически *неэффективными*, поскольку для указанных помещений велика доля инфильтрации. Поэтому для помещений с высоким значением воздухопроницаемости ограждающих конструкций в целях энергосбережения необходимо применять герметизирующие энергосберегающие мероприятия.

Определение фактического воздухообмена учебных аудиторий ИГЭУ выполнено с использованием установки, изготовленной специалистами ООО «Кон-

Вен» (г. Иваново) по проекту ИГЭУ, принципиальная схема которой приведена на рисунке 3.16.

Экспериментальная установка (аэродверь) представляет собой раздвижную воздухо непроницаемую раму 4, устанавливаемую в проем ограждения 3 испытываемого объекта 1, с отверстием для вентилятора 6. В местах прилегания рамы к ограждениям проложен уплотнитель 2. Вентилятор имеет переменную, плавно регулируемую скорость вращения. В комплект установки также входит термоанемометр 9, дифференциальный манометр 5 и комплект гибких трубок. При помощи вентилятора в обследуемое помещение нагнетается воздух до достижения разности давлений в аудитории и окружающей среде $\Delta p = 50$ Па. В данном режиме измеряют расход воздуха в пяти точках выходного сечения трубы 9 для определения расхода воздуха через вентилятор. По среднему расходу воздуха находят кратность воздухообмена для данного помещения n_{50} по формуле

$$n_{50} = \frac{L_{50}}{V}, \quad (3.28)$$

где L_{50} – расход воздуха через вентилятор при разности давлений $\Delta p = 50$ Па, м³/ч.

Рассчитанную кратность воздухообмена помещения n_{50} сравнивают со значениями, приведенными в СП 23-101-2004 [96], и по таблице 3.6 определяют класс воздухопроницаемости ограждающих конструкций.

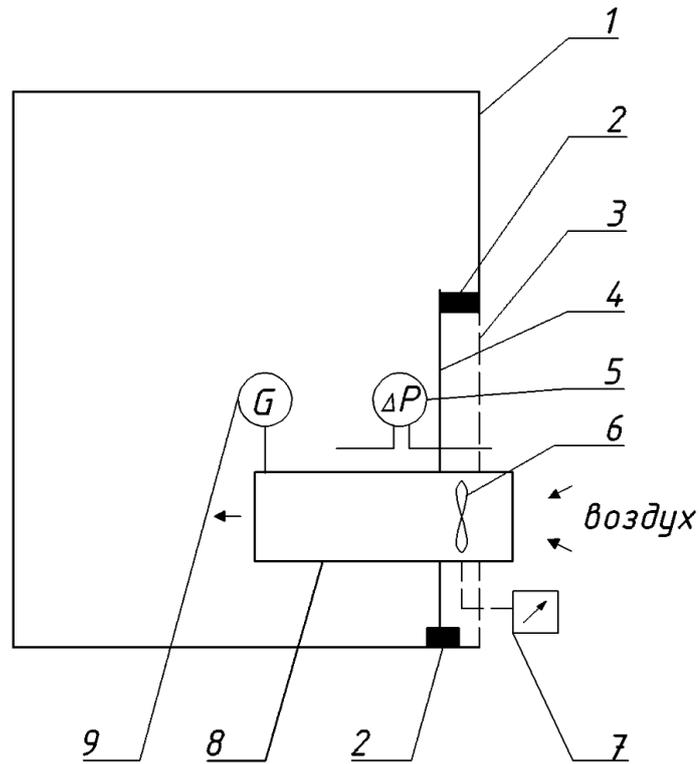
Расход воздуха через ограждающие конструкции L_{50} равен расходу воздуха подаваемого вентиляторам для поддержания разности давлений в 50 Па и может быть пересчитан на стандартные атмосферные условия ($p = 101,3$ кПа, $T_e = 20$ °С = 293 К):

$$L_{\phi} = k \cdot L_{50}, \quad (3.29)$$

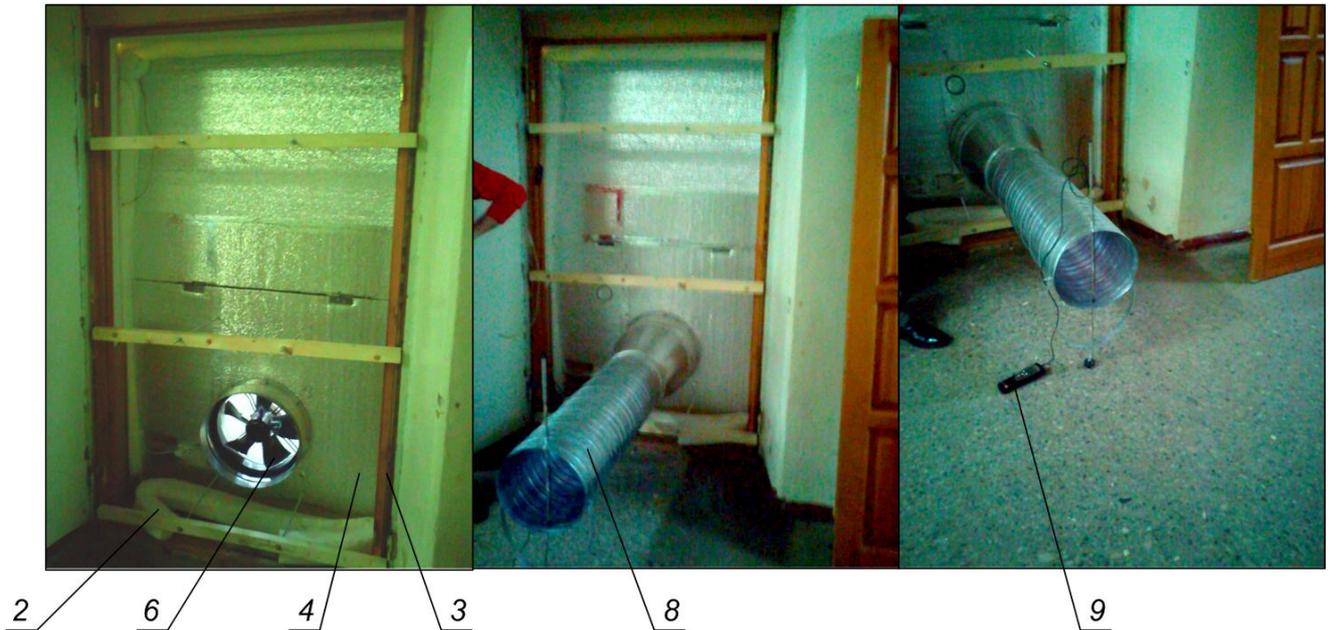
где k – поправочный коэффициент на стандартные атмосферные условия:

$$k = \frac{273 + T_n}{273 + T_e} \sqrt{\frac{101,3}{(p_n - \Delta p)} \cdot \frac{(273 + T_e)}{(273 + 20)}}, \quad (3.30)$$

где T_n , T_e – температуры воздуха внутри и снаружи испытываемого помещения, °С;



а)



б)

Рисунок 3.16 – Установка для определения воздухопроницаемости ограждающих конструкций:
 1 – ограждающие конструкции помещения; 2 – уплотнение; 3 – дверной проем; 4 – воздухопроницаемая раздвижная дверь; 5 – дифманометр; 6 – осевой вентилятор; 7 – регулятор числа оборотов вентилятора; 8 – труба для выравнивания скорости воздушного потока; 9 – расходомер

p_n – истинное барометрическое давление наружного воздуха в процессе испытаний, кПа;

Δp – разность давлений наружного и внутреннего воздуха, кПа.

Фактический расход приточного воздуха, рассчитанный по формуле (3.29), сравнивают с минимально допустимым по санитарно-эпидемиологическим нормам и, при необходимости, разрабатывают меры по снижению или увеличению воздухообмена помещения, принимая во внимание также требования энергосбережения.

Определим фактический воздухообмен учебной аудитории А-317 (корпус «А», ИГЭУ). Аудитория предназначена для проведения лабораторных занятий и, согласно санитарно-эпидемиологическим требованиям [100] кратность воздухообмена должна быть равна $n = 2 \text{ ч}^{-1}$ и при этом должен быть обеспечен приток свежего воздуха не менее $20 \text{ м}^3/\text{ч}$ на одно место. Помещение А-317 рассчитано на присутствие 21 человека. Минимальный приток воздуха, который должен быть обеспечен с точки зрения санитарно-эпидемиологических норм составляет

$$L^c = N \cdot l_n = 21 \cdot 20 = 420 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Объем экспериментального помещения А-317 равен $V = 226,63 \text{ м}^3$.

Минимально допустимая кратность воздухообмена помещения А-317 составляет

$$n_c = \frac{L^c}{V} = \frac{420}{226,63} = 1,85 \text{ ч}^{-1} < 2 \text{ ч}^{-1}.$$

Для обеспечения притока свежего воздуха минимум $20 \text{ м}^3/\text{чел.}$ в помещении должна поддерживаться кратность воздухообмена $1,85 \text{ ч}^{-1}$, что меньше значения, рекомендуемого для данного типа помещений [100]. Таким образом, в качестве расчетного воздухообмена для обеспечения санитарно-эпидемиологических норм было принято значение $n = 2 \text{ ч}^{-1}$. Вентиляция в помещении А-317 естественная, таким образом, наружный воздух поступает за счет инфильтрации через ограждающие конструкции.

Определение фактической воздухопроницаемости ограждений помещения А-317 проводилось по методике, изложенной в ГОСТ 31167-2009 «Здания и сооружения. Методы определения воздухопроницаемости ограждающих конструкций в натуральных условиях». В помещении были плотно закрыты все двери, кроме одной, в которой располагалась аэродверь, а окна, вентиляционное отверстие, места перетекания воздуха в другие помещения (вдоль трубопроводов системы отопления) были загерметизированы.

Были измерены параметры воздуха в помещении А-317 и за его пределами:

- температура воздуха в помещении $T_{в} = 23,9$ °С;
- давление наружного воздуха $p_{н} = 100,188$ кПа;
- температура наружного воздуха $T_{н} = -5,9$ °С;
- скорость движения наружного воздуха $w_{н} = 2$ м/с.

Условия проведения эксперимента соответствовали требованиям ГОСТа 31167 [28].

Воздухонепроницаемая дверь с вентилятором устанавливалась в проеме входной двери в экспериментальную аудиторию А-317. Места прилегания рамы к ограждающим конструкциям уплотнялись для исключения перетоков воздуха в помещение и из него. В комплект аэродвери входят измерительные приборы: расходомер и дифференциальный манометр, к которому присоединяют гибкие патрубки для измерения перепада давлений в обследуемом помещении и за его пределами. Вентилятор установки подключался к сети переменного тока, и его мощность плавно увеличивалась до достижения разности давлений $\Delta p = 50$ Па.

В результате эксперимента установлено, что при $\Delta p = 50$ Па расход воздуха через вентилятор $L_{50} = 1594$ м³/ч. При этом кратность воздухообмена составила величину

$$n_{50} = \frac{L_{50}}{V} = \frac{1594}{226,63} = 7,03 \text{ ч}^{-1}.$$

Коэффициент пересчета воздухообмена на стандартные атмосферные условия равен

$$k = \frac{273 + T_n}{273 + T_e} \sqrt{\frac{101,3}{(p_n - \Delta p)} \cdot \frac{(273 + T_e)}{(273 + 20)}} =$$

$$= \frac{273 + (-5,9)}{273 + (23,9)} \sqrt{\frac{101,3}{(100,188 - 0,05)} \cdot \frac{(273 + 23,9)}{(273 + 20)}} = 0,91.$$

Фактический объемный расход приточного воздуха с учетом корректировки на стандартные атмосферные условия составил

$$L_\phi = k \cdot L_{50} = 0,91 \cdot 1594 = 1450,54 \text{ м}^3 / \text{ч}.$$

Фактическая кратность при стандартных атмосферных условиях равна

$$n_\phi = \frac{L_\phi}{V} = \frac{1450,54}{226,63} = 6,4 \text{ ч}^{-1}.$$

Экспериментальное определение фактического воздухообмена учебной аудитории А-317 позволило сделать следующие выводы:

1) воздухообмен экспериментального помещения А-317 соответствует санитарно-эпидемиологическим нормам, поскольку $n_\phi = 6,4 \text{ ч}^{-1} > n = 2 \text{ ч}^{-1}$;

2) ограждающим конструкциям учебной аудитории можно присвоить «высокий» класс воздухопроницаемости, поэтому для помещения рекомендуется разработать мероприятия по снижению воздухообмена.

3) избыток поступающего в помещение воздуха приводит к тому, что комфортность помещения в холодный период года снижается: наблюдаются сквозняки, некомфортно низкая температура воздуха. Для повышения комфортности помещений рекомендуется снизить воздухообмен путем уплотнения элементов оконных блоков.

На основе вышеизложенного, можно сделать вывод о влиянии воздухообмена на комфортность микроклимата помещения и на качество энергосбережения. Так низкий воздухообмен приводит к ухудшению качества воздушной среды (возрастание концентрации CO_2), а высокий воздухообмен вызывает сквозняки и снижение температуры воздуха в помещении в холодный период года за счет повышения потерь тепловой энергии через ограждения. Создавая комфортный мик-

роклимат важно выполнить требования санитарно-эпидемиологических норм [90, 100] и требования энергосбережения по кратности воздухообмена [96, 98].

3.4 Проверка адекватности математической модели микроклимата в помещении

На основе обзора литературных источников для реализации составленной в параграфе 3.1 математической модели микроклимата выбран программно-вычислительный комплекс Fluent платформы ANSYS Workbench [44, 59, 138]. Решение уравнений переноса субстанции в ПВК ANSYS Fluent получает методом конечных элементов.

Проверка адекватности предложенной математической модели процессов теплообмена при формировании микроклимата помещений была выполнена путем сравнения результатов натурального эксперимента с расчетами, выполненными в ПВК ANSYS Fluent.

Результаты экспериментальных исследований представлены в разделе 3.2 диссертации. Там же приведены специально разработанные геометрические модели помещений (рис. 3.2 и 3.3).

При помощи встроенного в ANSYS сеточного редактора Meshing на геометрические модели была наложена сетка по методу CutCell (декартова многоуровневая сетка). Автоматическая генерация адаптированной сетки позволила получить сетку, состоящую из 1488278 элементов и 1817190 узлов со средним по объему расчетной области качеством элементов 0,98. Внешний вид расчетной сетки представлен на рисунке 3.17.

Численная реализация разработанной математической модели микроклимата получена для стационарного режима с использованием метода установления (псевдо нестационарного метода) Pseudo Transient.

Граничные условия заданы в соответствии с условиями проведения эксперимента (таблица 3.3). Для решаемых дифференциальных уравнений в целях повышения точности расчета выбран второй порядок аппроксимации. Для сокраще-

ния времени расчета «шаг по времени» (итерационный параметр) уменьшался каждые 150 итераций (с 10 с до 0,1 с).

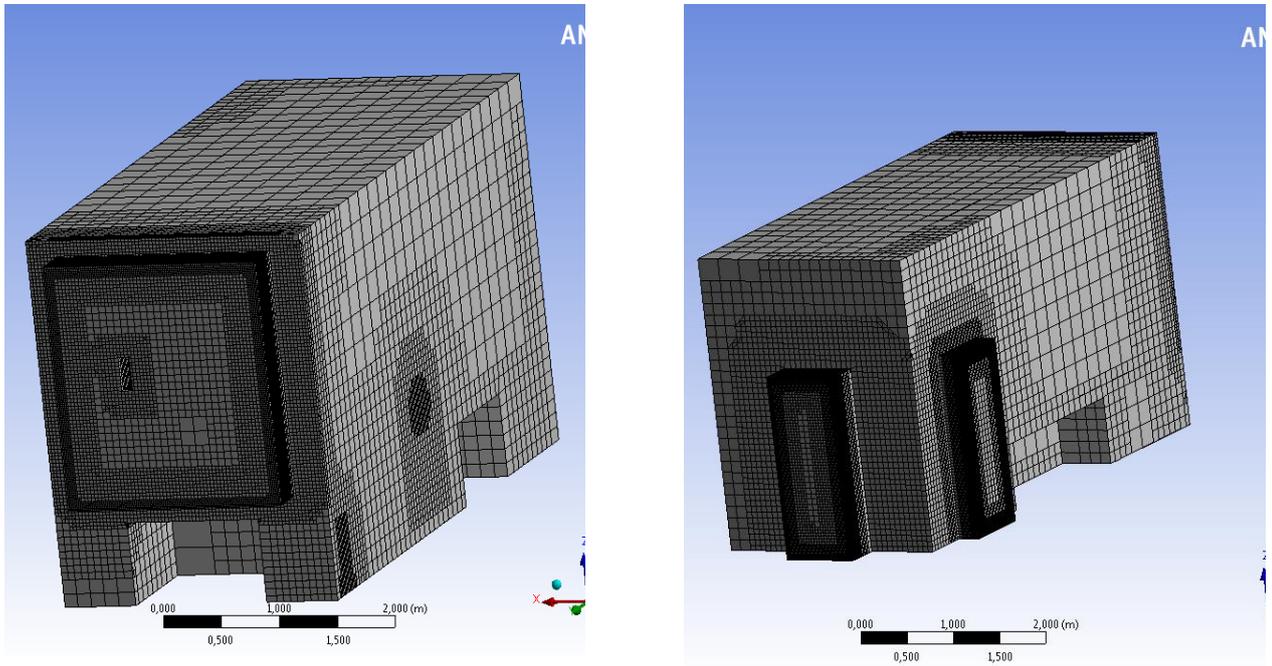


Рисунок 3.17 – Расчетная сетка для помещения А318

Стационарное решение получено через через 4603 с машинного времени за 420 итераций на ПК типа Supermicro (серверная ячейка).

Обработка результатов расчета выполнена при помощи встроенного модуля ANSYS CFD-Post, который позволяет выполнить визуализацию и интерпретацию результатов расчета в виде графиков, диаграмм и таблиц.

Для сопоставления результатов моделирования и эксперимента анализировалось изменение параметров микроклимата (температуры, относительной влажности и подвижности воздуха) по высоте помещения в двух точках (line 1 и line 2, рис. 3.18).

На рисунках 3.19 и 3.20 приведено изменение температуры воздуха по высоте помещения в контролируемых точках 1 и 2 (соответственно элементы 2 и 10 на рис. 3.2).

Для проверки обоснованности представления воздуха в виде четырехкомпонентной газовой смеси расчеты выполнены в два этапа:

- на первом этапе воздух был представлен в виде двухкомпонентного (N_2 и O_2) идеального газа;
- на втором этапе расчета воздух рассматривался как четырехкомпонентная смесь (N_2 , O_2 , CO_2 и H_2O).

Проверка адекватности выполнена путем сравнения экспериментальных значений температуры, подвижности, относительной влажности воздуха и концентрации CO_2 с результатами реализации математической модели в ППК ANSYS Fluent.

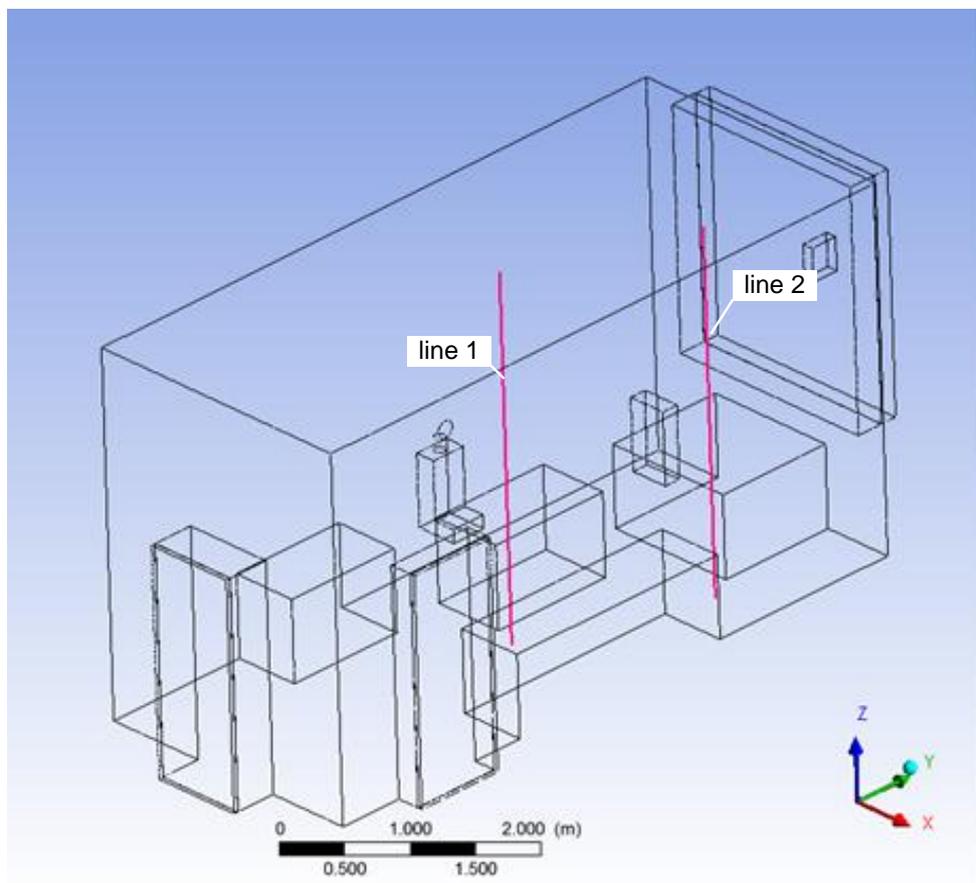


Рисунок 3.18 – Вспомогательные линии в помещении А-318 для обработки результатов расчета в ANSYS CFD-Post

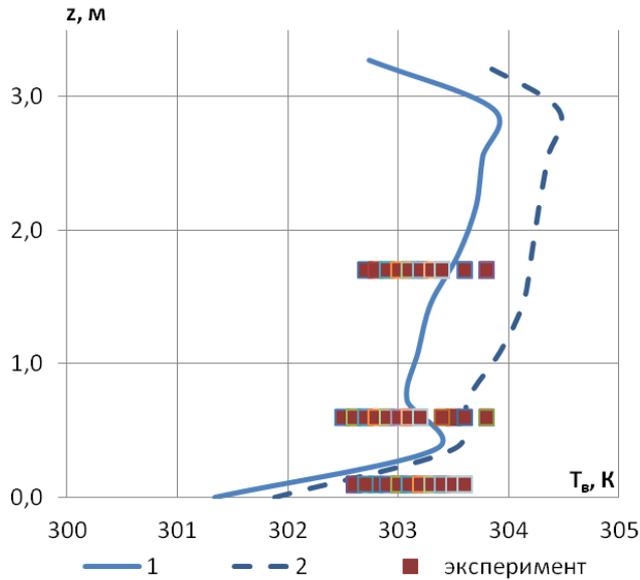


Рисунок 3.19 – Температура воздуха в точке 1 по результатам эксперимента и расчета в ANSYS Fluent: 1 – воздух – идеальный газ; 2 – воздух – четырехкомпонентная смесь газов

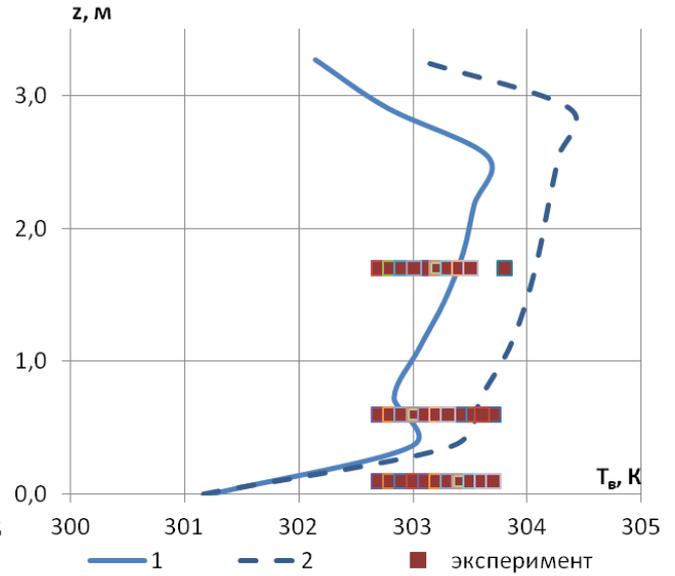


Рисунок 3.20 – Температура воздуха в точке 2 по результатам эксперимента и расчета в ANSYS Fluent: 1 – воздух – идеальный газ; 2 – воздух – четырехкомпонентная смесь газов

Сравним экспериментальные значения температуры и рассчитанные в ПВК, определив критерий Фишера по формуле:

$$f_{эмт} = \frac{D_1^2}{D_2^2}, \quad (3.31)$$

где D^2 – дисперсии двух выборок значений температур; индексы 1 и 2 – соответствуют большей и меньшей из дисперсий, определенных для температур рассчитанных и измеренных.

Критическое значение критерия Фишера определяем для сравниваемых выборок при степенях свободы:

$$v_1 = n_1 - 1 \text{ и } v_2 = n_2 - 1, \quad (3.32)$$

где n_1 и n_2 – число значение температуры в сравниваемых выборках.

Дисперсия расчета температуры в ПВК ANSYS FLUENT в случае представления воздуха как идеального газа составляет $D_{p,2}^2 = 0,479$; для воздуха – четырехкомпонентной смеси идеальных газов, дисперсия – $D_{p,4}^2 = 0,813$.

Для $n_{1(p,2)} = 10$ и $n_{1(p,4)} = 10$ (количество рассчитанных значений температуры для двух и четырехкомпонентного воздуха) и $n_2 = 3$ (количество измеренных значений температуры в каждой опытной точке) число степеней свободы составляет

$$v_{1(p,2)} = v_{1(p,4)} = 9 \text{ и } v_2 = 2.$$

Критическое значение критерия Фишера – $f_{кр} = 19,39$.

В таблице 3.7 приведена дисперсия для измеренной температуры, а также эмпирические значения критерия Фишера.

Таблица 3.7 – Критерий Фишера для температуры

№ эксперимента	Температура в помещении на высоте			Дисперсия	Критерий Фишера (воздух – идеальный газ)	Критерий Фишера (воздух – 4-х компонентная смесь газов)
	1,7 м	0,6 м	0,1 м			
1	303,2	302,9	302,6	0,030	27,067	15,973
2	303,8	303,1	302,8	0,107	7,586	4,477
3	302,2	303,4	303	0,148	5,481	3,235
4	302,7	303,6	303,2	0,073	11,186	6,601
5	302,8	303,8	303,4	0,095	8,564	5,054
6	302,9	303,8	303,4	0,073	11,186	6,601
7	303,1	302,7	302,6	0,030	27,067	15,973
8	303,15	302,6	302,7	0,037	21,924	12,938
9	303,3	302,9	302,7	0,037	21,924	12,938
10	303,4	302,3	301,8	0,270	3,007	1,775
11	303,6	302,5	302,9	0,120	6,767	3,993
12	303,8	302,6	303	0,148	5,481	3,235
13	303,8	302,6	303	0,148	5,481	3,235
14	303,8	302,7	303,1	0,120	6,767	3,993
15	303,9	302,8	303,3	0,107	7,586	4,477
16	303,4	302,6	303	0,053	15,225	8,985
17	303,52	302,1	303,4	0,088	9,244	5,456
18	303,45	302,51	303,5	0,029	27,678	16,334
19	303,8	303,2	303,5	0,030	27,067	15,973
20	303,4	302,4	303,2	0,053	15,225	8,985
21	303,4	302,3	303,6	0,030	27,067	15,973
22	303,4	302,6	303,2	0,037	21,924	12,938
23	303,2	302,9	302,6	0,030	27,067	15,973
24	303,8	303,1	302,8	0,107	7,586	4,477
25	302,2	303,4	303	0,148	5,481	3,235

Анализ таблицы 3.7 показывает, что в случае расчета движения и теплообмена в ПВК воздуха как четырехкомпонентной смеси идеальных газов $f_{эмп} < f_{доп}$.

Таким образом, при определении температуры воздуха методом математического моделирования в ANSYS Fluent воздух рассматриваем, как четырехкомпонентную смесь идеальных газов.

Относительная погрешность расчета температуры воздуха для двух моделей состава воздуха и приведена в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Погрешность расчета температуры воздуха в среде ANSYS Fluent

№ точки измерения	Высота над уровнем пола, м	$T_{в,э}$, К (эксперимент)	Воздух – идеальный газ		Воздух – четырехкомпонентная смесь газов	
			$T_{в,р}$, К (расчет)	Относительная погрешность %	$T_{в,р}$, К (расчет)	Относительная погрешность %
1	0,1	303,1	301,94	3,85	302,18	3,06
	0,6	303,1	303,67	1,89	303,05	0,17
	1,7	303,2	303,95	2,48	303,37	0,56
2	0,1	303,4	302,05	4,44	302,50	2,96
	0,6	303,5	303,80	0,98	303,35	0,49
	1,7	303,6	304,47	2,84	303,33	0,88

Анализ рисунков 3.19 и 3.20, а также таблицы 3.8 показывает, что представление воздуха в помещении как четырехкомпонентной смеси газов существенно повышает точность расчета температуры воздуха.

На рисунках 3.21 и 3.22 приведено изменение подвижности воздуха по высоте помещения в контролируемых точках 1 и 2 (соответственно элементы 2 и 10 на рис. 3.2). На рисунке 3.23 изображено изменение по высоте помещения влагосодержания. Относительная погрешность расчета влагосодержания воздуха для двух моделей состава воздуха и приведена в таблице 3.9.

Анализ рисунков 3.19 – 3.23, а также таблиц 3.8 и 3.9 показывает, что данные экспериментальных исследований по определению параметров внутренней среды объекта совпадают с результатами расчета с меньшей погрешностью, если воздух представлен как четырехкомпонентная смесь газов.

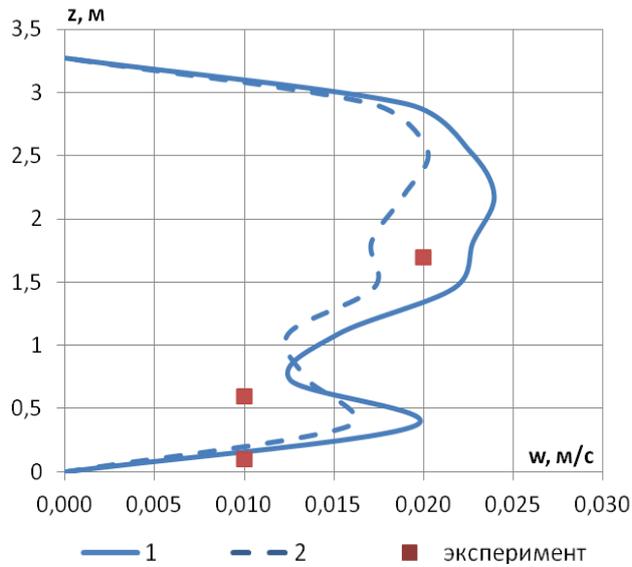


Рисунок 3.21 – Подвижность воздуха в точке 1 по результатам эксперимента и расчета в ANSYS Fluent: 1 – воздух – идеальный газ; 2 – воздух – четырехкомпонентная смесь газов

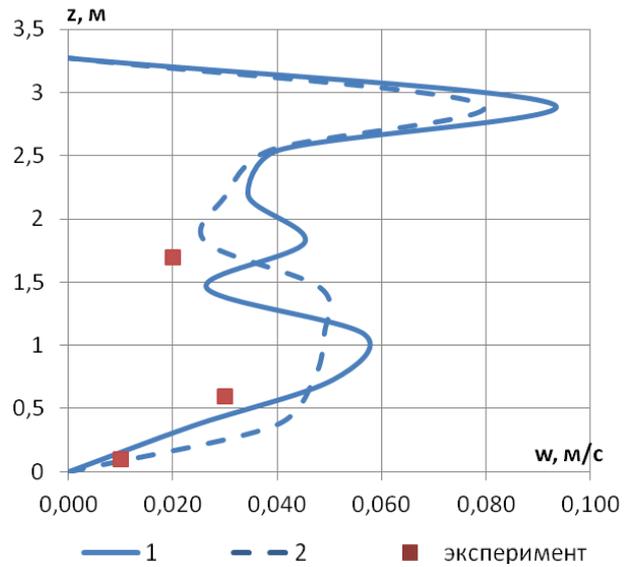


Рисунок 3.22 – Подвижность воздуха в точке 2 по результатам эксперимента и расчета в ANSYS Fluent: 1 – воздух – идеальный газ; 2 – воздух – четырехкомпонентная смесь газов

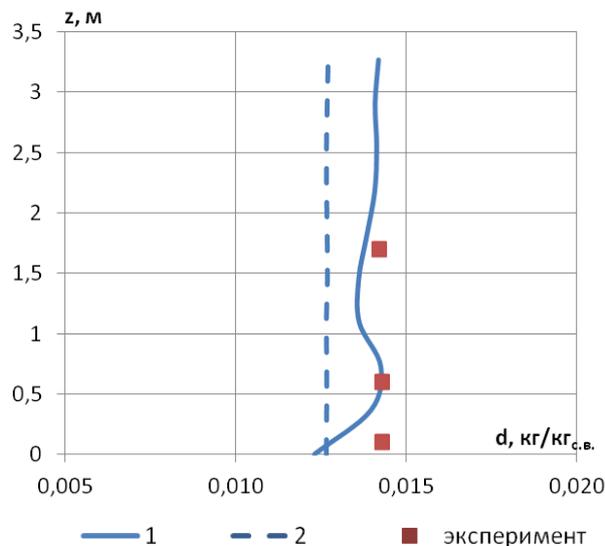


Рисунок 3.23 – Влажосодержание воздуха в точке 2 по результатам эксперимента и расчета в ANSYS Fluent: 1 – воздух – идеальный газ; 2 – воздух – четырехкомпонентная смесь газов

Таблица 3.9 – Погрешность расчета влажосодержания воздуха в среде ANSYS Fluent

№ точки измерения	Высота над уровнем пола, м	d, кг/кг _{с.в.} (эксперимент)	Воздух состоит из двух компонентов		Воздух состоит из четырех компонентов	
			d, кг/кг _{с.в.} (расчет)	Относительная погрешность, %	d, кг/кг _{с.в.} (расчет)	Относительная погрешность, %
1	0,1	0,0143	0,0127*	11,19	0,0130	9,09
	0,6	0,0143	0,0127*	11,19	0,0142	0,70
	1,7	0,0142	0,0127*	10,56	0,0151	6,34

* – определено по H,d-диаграмме для влажного воздуха при атмосферном давлении

Отличие расчетных и экспериментальных значений подвижности воздуха и влагосодержания можно объяснить как погрешностью численного расчета, так и погрешностью экспериментального определения данных параметров.

На рисунке 3.24 приведена геометрическая модель помещения А316к, а также вспомогательные линии для обработки результатов расчета в ANSYS CFD-Post. Положение вспомогательных линий соответствует экспериментальным точкам, в которых были измерены параметры внутренней среды помещения.

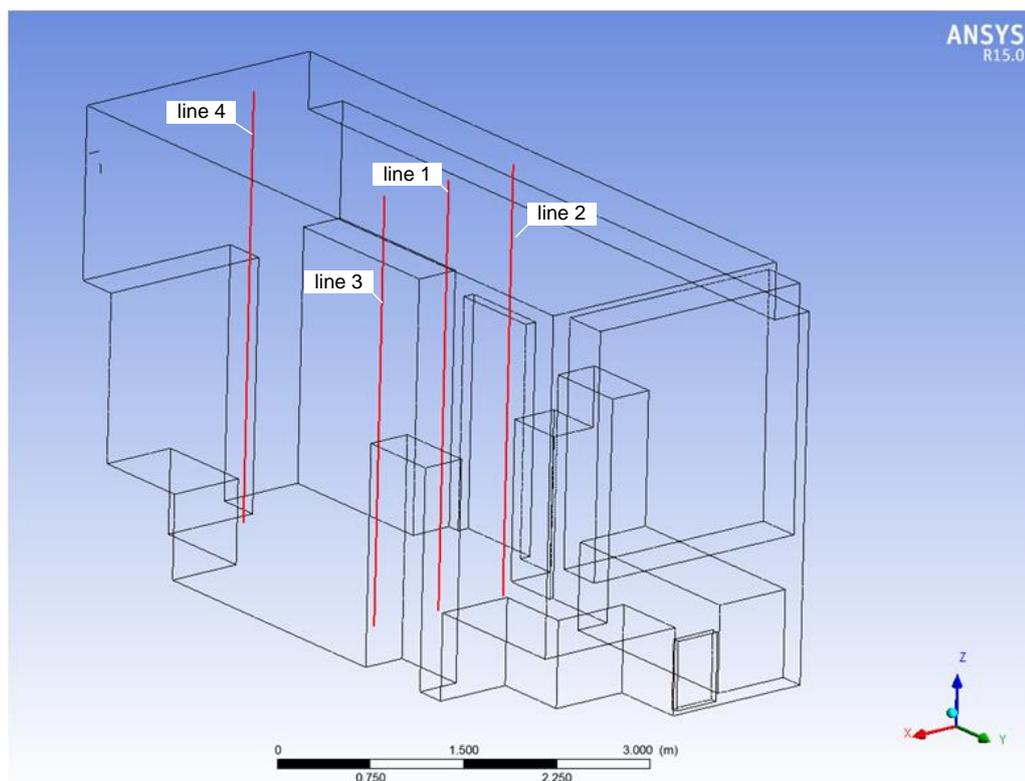


Рисунок 3.24 – Геометрическая модель аудитории А316к со вспомогательными линиями для обработки результатов расчета в ANSYS CFD-Post

Внешний вид расчетной сетки для аудитории А316к приведен на рисунке 3.25.

На рисунках 3.26 – 3.31 приведены результаты расчета параметров микроклимата в ANSYS Fluent при условии, что воздух является четырехкомпонентной смесью газов, а также результаты эксперимента.

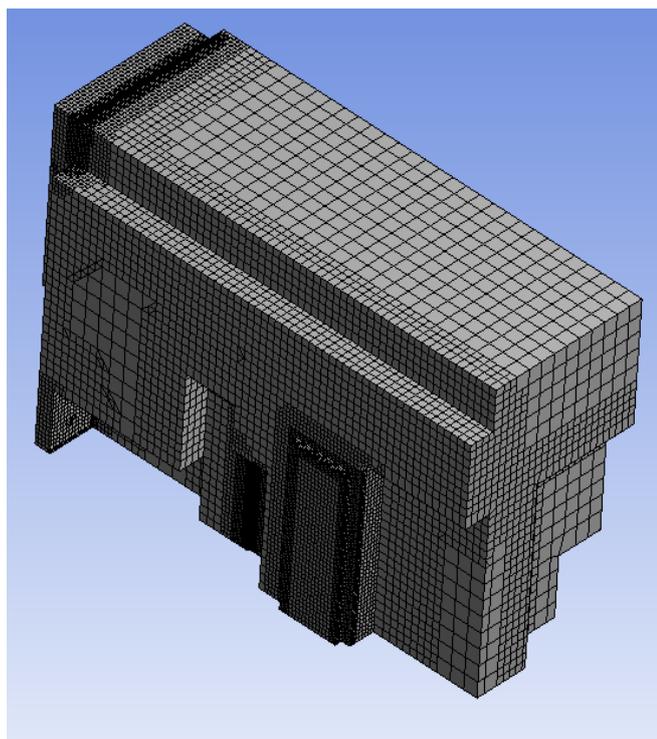


Рисунок 3.25 – Расчетная сетка для помещения А316к

Анализ рисунков 3.26 – 3.31 свидетельствует о удовлетворительном совпадении результатов расчета параметров микроклимата в помещении здания при помощи разработанной математической модели в ПК ANSYS Fluent с результатами экспериментальных исследований, что подтверждает возможность использования разработанной математической модели для прогнозирования изменения микроклимата в помещении здания непромышленного назначения после реализации энергосберегающих мероприятий.

3.5 Влияние модели турбулентности на результаты моделирования

При реализации представленной математической модели процессов тепло-массообмена в помещении при формировании микроклимата было выполнено исследование влияния на точность расчета параметров внутренней среды помещения модели турбулентности.

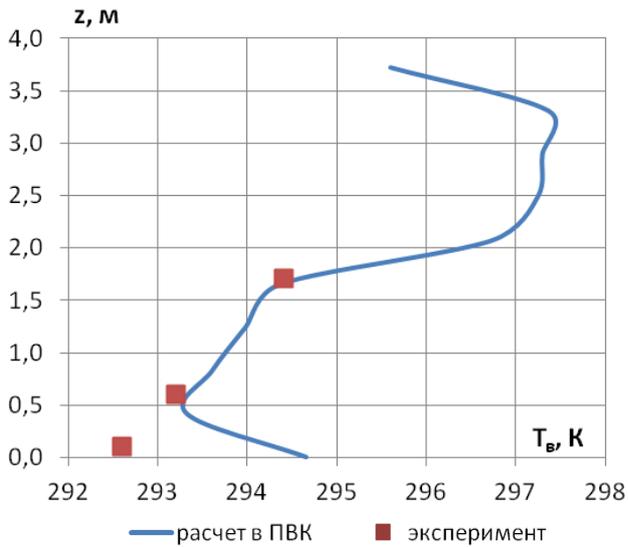


Рисунок 3.26 – Температура воздуха в центре помещения (line1, рис. 3.24) по результатам эксперимента и расчета в ANSYS Fluent

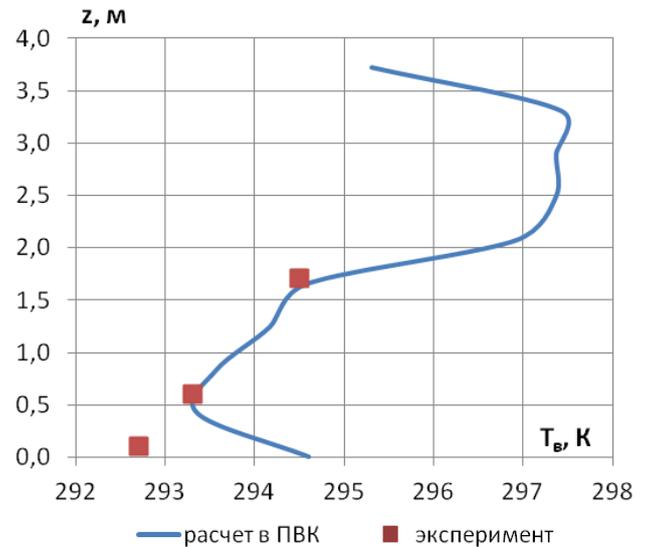


Рисунок 3.27 – Температура воздуха на расстоянии 0,5 м от левой стены помещения (line2, рис. 3.24) по результатам эксперимента и расчета в ANSYS Fluent

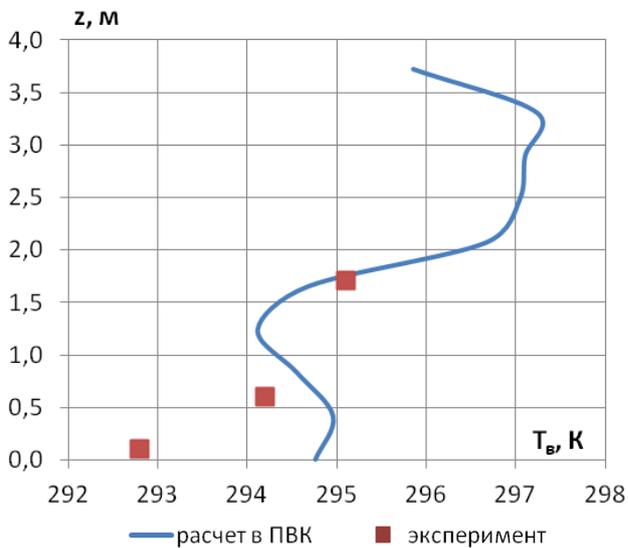


Рисунок 3.28 – Температура воздуха на расстоянии 0,5 м от правой стены помещения (line3, рис. 3.24) по результатам эксперимента и расчета в ANSYS Fluent

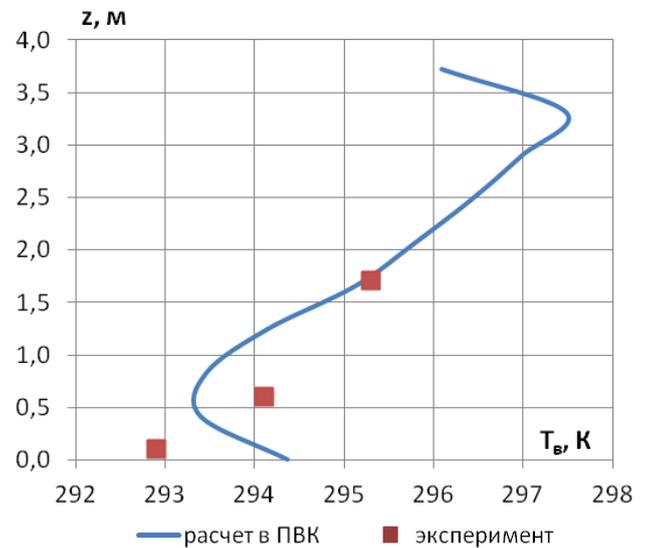


Рисунок 3.29 – Температура воздуха на расстоянии 0,5 м от фронтальной стены помещения (line4, рис. 3.24) по результатам эксперимента и расчета в ANSYS Fluent

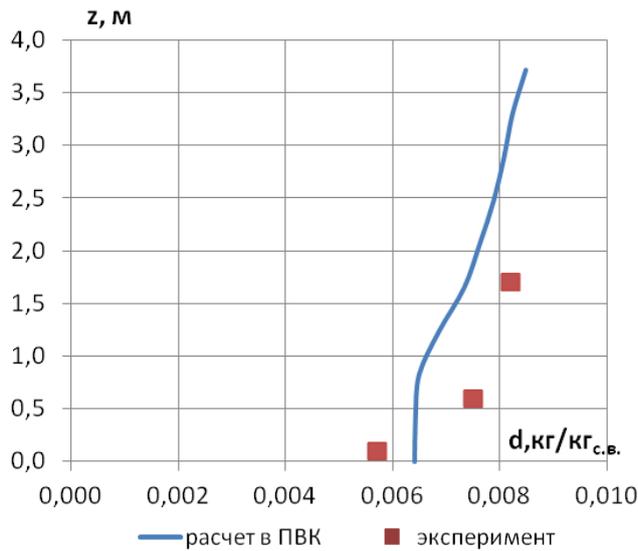


Рисунок 3.30 – Влажность воздуха на расстоянии 0,5 м от фронтальной стены помещения (line4, рис. 3.24) по результатам эксперимента и расчета в ANSYS Fluent

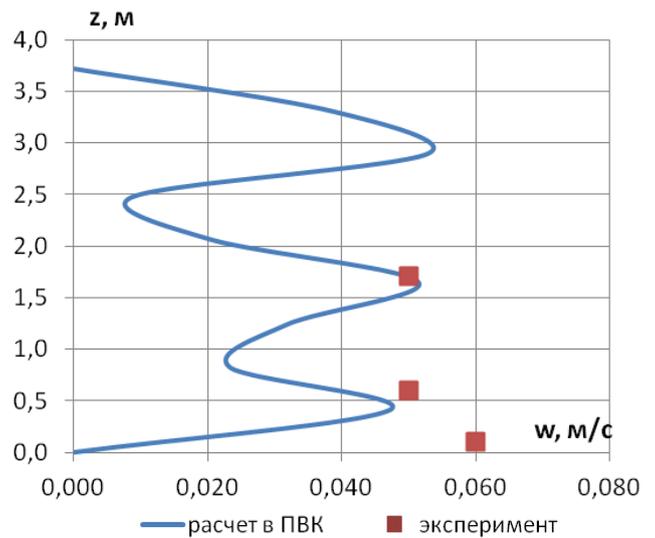


Рисунок 3.31 – Подвижность воздуха на расстоянии 0,5 м от левой стены помещения (line2, рис. 3.24) по результатам эксперимента и расчета в ANSYS Fluent

В ПВК ANSYS Fluent был выполнен расчет температуры воздуха, его скорости и содержания влаги при использовании следующих моделей:

- k - ε модели турбулентности (*Standard k- ε*);
- k - ω модели турбулентности (*Standard k- ω*);
- модели турбулентности Спаларта-Аллмараса (*Spalart-Allmaras*);
- переходной *SST* модели турбулентности (*Transition SST model*);
- модели Рейнольдсовых напряжений (*Reynolds Stress Model, RSM*).

На рисунках 3.32 – 3.34 приведены результаты измерения и расчета температуры, подвижности и влагосодержания воздуха в центре экспериментального помещения.

Анализ рисунков 3.32 – 3.34 показал, что наибольшее согласование результатов экспериментального определения и расчета температуры и подвижности воздуха в ПВК ANSYS Fluent наблюдается при использовании моделей турбулентности k - ε . Больше согласование результатов моделирования и эксперимента при расчете влагосодержания наблюдается при модели *Transition SST*.

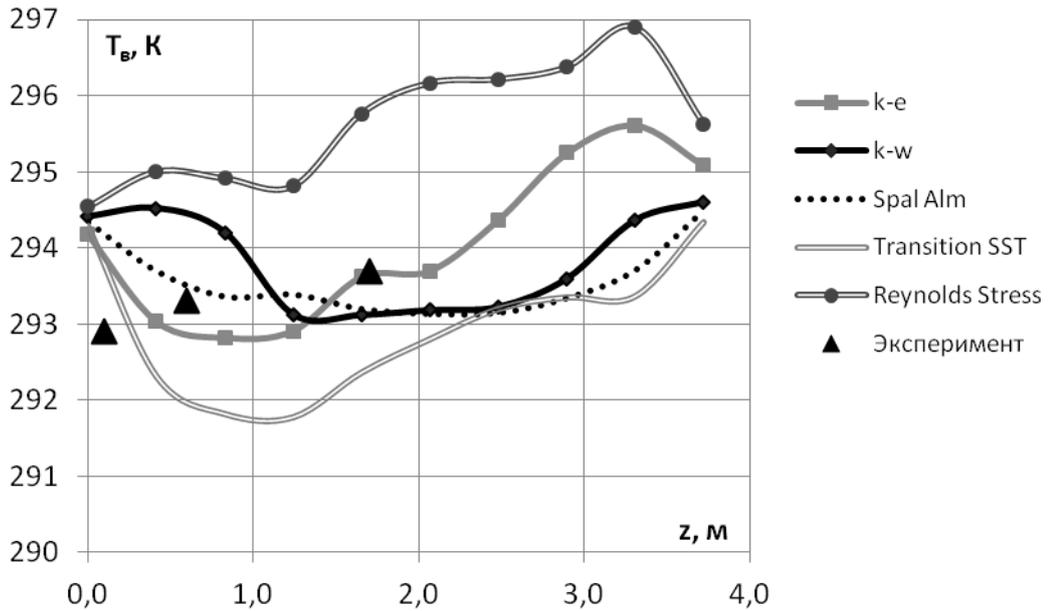


Рисунок 3.32 – Температура воздуха в центре помещения А-316к (line1, рис. 3.24) по результатам эксперимента и моделирования в ANSYS Fluent

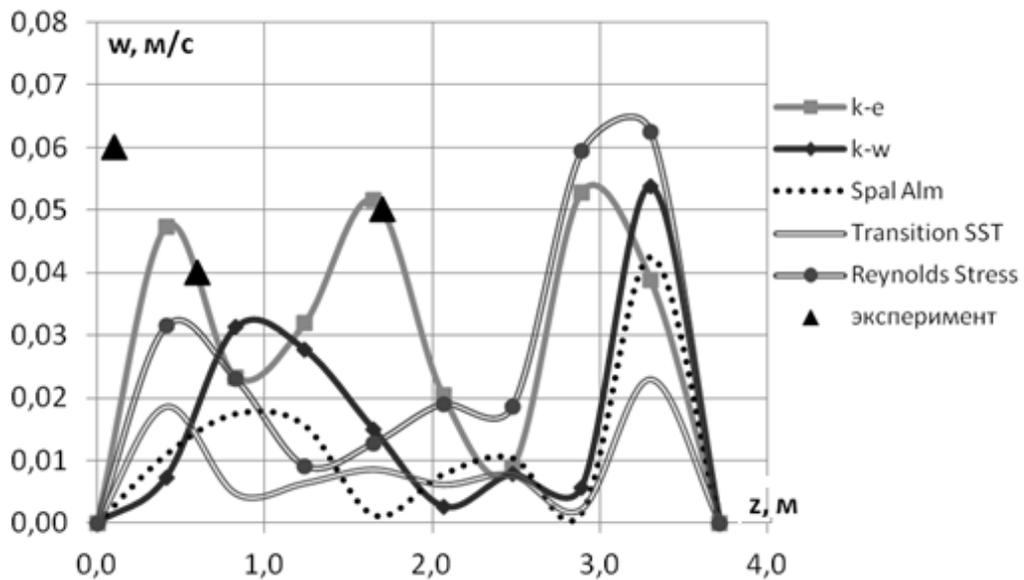


Рисунок 3.33 – Подвижность воздуха в центре помещения А-316к (line1, рис. 3.24) по результатам эксперимента и моделирования в ANSYS Fluent

Таким образом, удовлетворительное согласование расчетных и экспериментальных данных при прогнозировании параметров внутренней среды помещений после реализации энергосберегающих мероприятий может быть достигнуто при использовании $k-\varepsilon$ модели турбулентности.

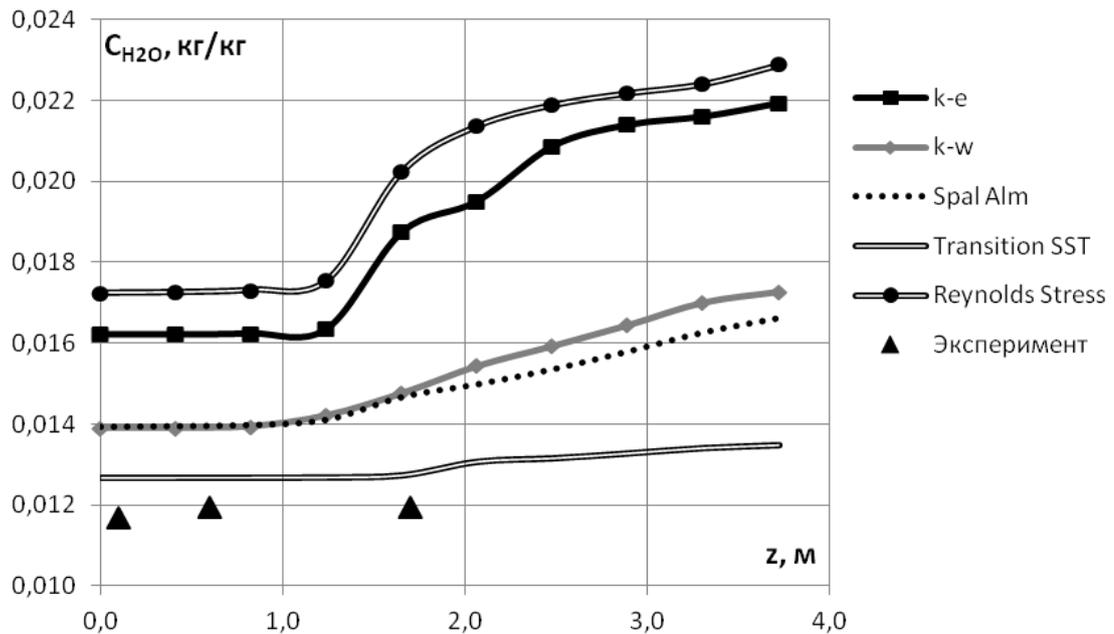


Рисунок 3.34 – Содержание влаги (H_2O) в воздухе в центре помещения А-316к (line1, рис. 3.24) по результатам эксперимента и моделирования в ANSYS Fluent

Также был выполнен анализ времени расчета параметров микроклимата в ANSYS Fluent с использованием разных моделей турбулентности. На рисунке 3.35 приведено время решения стационарной задачи, соответствующей условиям проведения эксперимента для аудитории А-316к, с использованием ПК типа Supermicro (серверная ячейка).

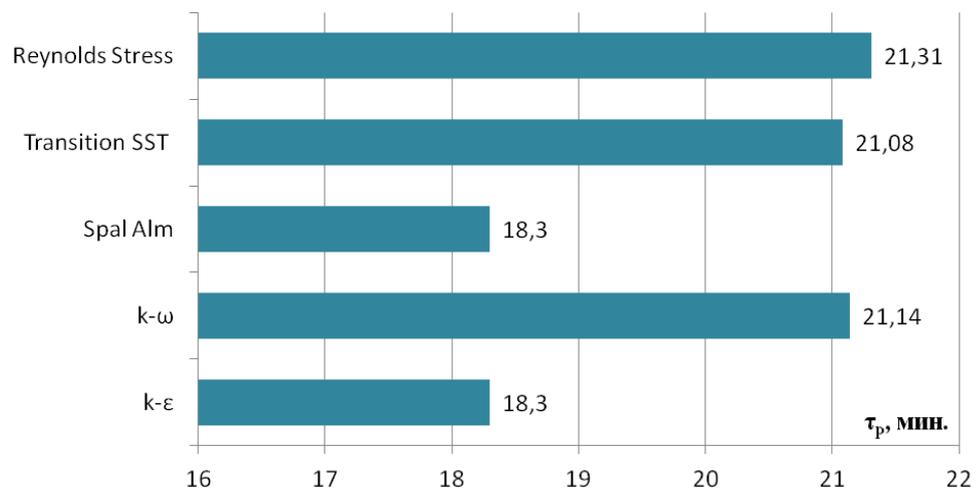


Рисунок 3.35 – Время решения стационарной задачи тепломассообмена в помещении здания в ПК ANSYS Fluent

Анализ временных параметров процесса вычисления показал, что меньшее время занимает расчет при описании турбулентных свойств текучей среды при помощи моделей турбулентности семейства $k-\varepsilon$ и модели Спаларта-Аллмараса.

На основе анализа расчета основных параметров микроклимата с разными моделями турбулентности для моделирования процессов тепломассообмена в помещении здания непроизводственного назначения с естественной вентиляцией была выбрана $k-\varepsilon$ модель турбулентности.

3.6 Влияние воздухообмена на микроклимат в помещении

В 1 главе диссертации было показано, что энергосберегающие мероприятия, связанные с герметизацией контура здания, приводят к нарушению воздухообмена помещений при их естественной вентиляции.

Разработанная в диссертации математическая модель формирования микроклимата (состояния внутренней среды) помещения позволяет оценить количественно последствия внедрения такого рода энергосберегающих мероприятий путем исследования влияния на параметры внутренней среды помещения кратности воздухообмена и объема вредных примесей, который определяется количеством присутствующих в помещении людей.

На рисунках 3.36 – 3.38 приведены значения средней температуры воздуха, влагосодержания воздуха и средней концентрации углекислого газа в воздухе в зависимости от кратности воздухообмена n и объема вредностей (количества человек, находящихся в помещении).

Анализ рисунков 3.36 – 3.38 показывает влияние воздухообмена на параметры микроклимата помещений. Снижение воздухообмена и увеличение численности людей в помещении (увеличение объема вредностей) приводят к росту температуры и влагосодержания воздуха, а также увеличению концентрации двуокиси углерода в воздушной среде.

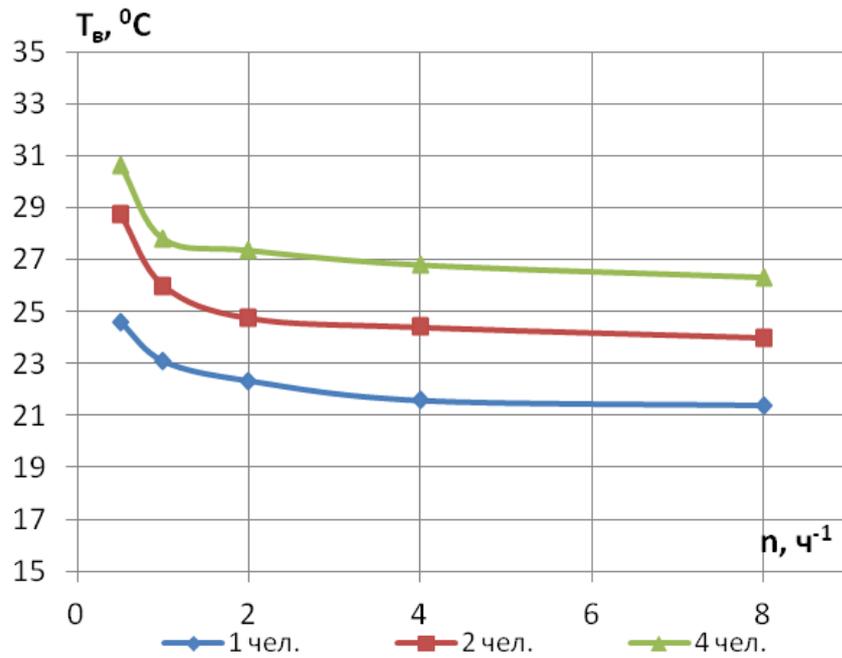


Рисунок 3.36 – Температура воздуха в помещении А-318 в зависимости от кратности воздухообмена и количества присутствующих в помещении людей

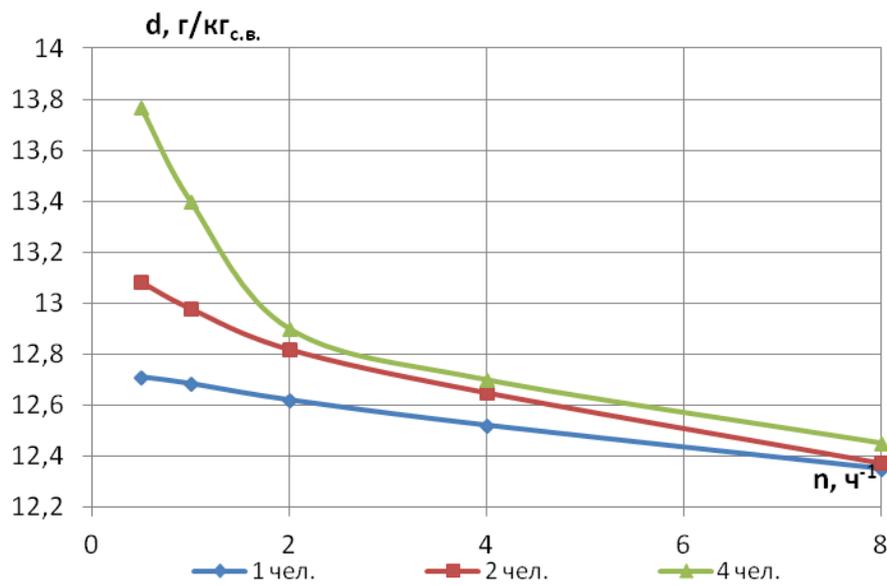


Рисунок 3.37 – Влажность воздуха в помещении А-318 в зависимости от кратности воздухообмена и количества присутствующих в помещении людей

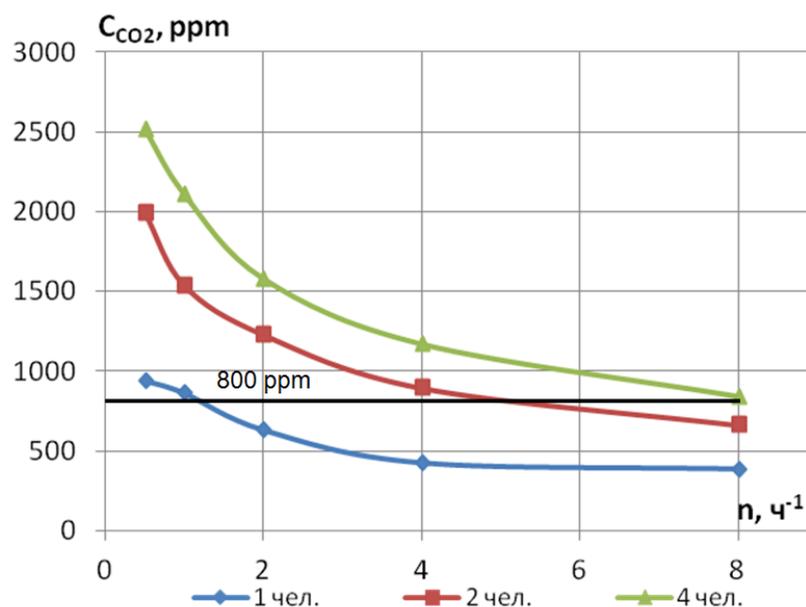


Рисунок 3.38 – Содержание двуокиси углерода в воздухе в помещении А-318 в зависимости от кратности воздухообмена и количества присутствующих в помещении людей

Несоблюдение санитарно-гигиенических норм по качеству воздушной среды [90, 100] вызывает у человека головную боль, головокружение, снижение концентрации внимания, общее ухудшение самочувствия, и нанесит вред здоровью при долговременном воздействии. В соответствии с исследованиями [42], восприятие человеком качества воздушной среды по содержанию углекислого газа классифицируется следующим образом:

1. $C_{CO_2} = 300 \div 400$ ppm: атмосферный воздух, идеальный для здоровья человека;
2. $C_{CO_2} = 400 \div 600$ ppm: нормальное качество воздуха;
3. $C_{CO_2} < 600$ ppm: уровень, рекомендованный для спален, детских садов и школ;
4. $C_{CO_2} = 600 \div 800$ ppm: появляются единичные жалобы на качество воздуха;
5. $C_{CO_2} = 800 \div 1000$ ppm: более частые жалобы на качество воздуха;
6. $C_{CO_2} > 1000$ ppm: общий дискомфорт, слабость, головная боль, проблемы с концентрацией внимания, растет число ошибок в работе;
7. $C_{CO_2} > 2000$ ppm: может вызвать серьезные отклонения в здоровье, количество ошибок в работе сильно возрастает (в среднем на 70%).

Таким образом, например, для помещения А-318 допустимое качество воздуха ($C_{CO_2} < 800$ ppm) может быть обеспечено:

- если в помещении находится 1 человек, а кратность воздухообмена n помещения составляет $n > 1$ ч⁻¹;
- если в помещении находится 2 человек, а $n > 5$ ч⁻¹);
- если в помещении находится 4 человек, а $n > 8$ ч⁻¹).

При помощи разработанной детерминированной математической модели микроклимата можно выполнить исследование влияния герметизирующих энерго-сберегающих мероприятий для любого здания непромышленного назначения с естественной вентиляцией. Определив экспериментально или выполнив расчет снижения кратности воздухообмена после внедрения энергосберегающих проектов можно сделать прогноз изменения микроклимата помещения и, как следствие, оценить влияние данной процедуры энергосбережения на самочувствие людей.

3.7 Выводы по главе 3

1. Разработана детерминированная математическая модель процессов тепломассообмена в помещении здания непромышленного назначения с естественной вентиляцией при формировании микроклимата, которая учитывает:

- состав газовой среды;
- наличие в помещении людей как источников теплоты, влаги и газовых примесей;
- фактический воздухообмен помещения;
- реальную геометрию объекта и расположение источников (стоков) теплоты и поступления (удаления) воздуха.

2. Математическая модель микроклимата реализована в ППК ANSYS Fluent. Для этого построены геометрические и сеточные модели экспериментальных помещений. Стационарное решение получено методом установления на численной модели. Выбором итерационных параметров достигнута сходимость вычислительного процесса.

3. Выполнены экспериментальные исследования процесса формирования микроклимата в помещениях учебного заведения при различных типах отопительных приборов в целях получения достоверных данных для проверки адекватности разработанной математической модели.

4. Разработана установка по определению воздухопроницаемости ограждающих конструкций помещения в целях установления фактического воздухообмена помещения с естественной вентиляцией. На примере показана взаимосвязь воздухообмена, комфортности микроклимата и энергосбережения.

5. Выполнено исследование влияния состава воздуха на точность математического моделирования.

6. Проверена адекватность математической модели процессов тепломассообмена в помещении здания путем сопоставления результатов экспериментального исследования и численного расчета в ППК ANSYS Fluent. Совпадение результатов расчета и эксперимента с погрешностью не более 10% доказывает возможность применения математической модели тепломассообмена в помещениях зданий непроизводственного назначения для выполнения прогноза влияния энергосберегающих мероприятий на микроклимат.

ГЛАВА 4. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ ЗАДАННОГО УРОВНЯ КОМФОРТНОСТИ МИКРОКЛИМАТА

В первой главе диссертационной работы показано, что используемые в настоящее время способы оценки эффективности энергосберегающих мероприятий не учитывают возможные отрицательные последствия процедуры энергосбережения. Во второй главе диссертации предложено в качестве основного критерия анализа целесообразности внедрения решений, направленных на сокращение потребления топливно-энергетических ресурсов в зданиях непроизводственного назначения, использовать изменение уровня комфортности микроклимата. Учет уровня комфортности микроклимата при внедрении энергосберегающих мероприятий позволяет решать несколько взаимосвязанных задач:

- 1) оценить внедрение энергосберегающих мероприятий с точки зрения их влияния на комфортность микроклимата помещений;
- 2) повысить точность оценки капитальных затрат на реализацию энергосберегающего мероприятия за счет учета стоимости внедрения возможных сопутствующих мероприятий, устраняющих отрицательные эффекты от реализации основного проекта;
- 3) уточнить расчетные параметры внутренней среды помещений зданий непроизводственного назначения;
- 4) по заданному $U_{ком}$ выбрать комфортные для человека параметры микроклимата, которые служат входными данными для регулирования систем энергообеспечения зданий непроизводственного назначения.

4.1 Метод оценки эффективности энергосберегающих мероприятий

Разработан новый метод оценки эффективности энергосберегающих мероприятий, учитывающий технический эффект (экономии энергии), экономические показатели реализации проекта, а также влияние энергосберегающего мероприя-

тия на комфортность микроклимата в помещениях объекта. Метод позволяет прогнозировать необходимость выполнения мер, направленных на устранение отрицательных эффектов от выполнения процедуры энергосбережения и, как следствие, повышает точность оценки показателей реализации проекта. Алгоритм оценки эффективности энергосберегающего мероприятия включает в себя три этапа.

На первом этапе определяют степень влияния энергосберегающего мероприятия на уровень комфортности микроклимата. Для этого находят уровень комфортности микроклимата до реализации энергосберегающего мероприятия ($U_{ком,1}$) и, прогнозируя параметры микроклимата в помещении после реализации энергосберегающего проекта, определяют уровень комфортности микроклимата ($U_{ком,2}$). Расчет параметров внутренней среды помещения после реализации энергосберегающего мероприятия выполняют на численной детерминированной математической модели микроклимата в программно-вычислительном комплексе ANSYS Fluent или упрощенным инженерным методом.

На втором этапе оценки эффективности энергосберегающих мероприятий сравнивают уровни комфортности до и после внедрения энергосберегающего мероприятия и делают вывод о целесообразности и эффективности выполнения процедуры энергосбережения. При этом возможны следующие комбинации уровней комфортности.

А. Если энергосберегающее мероприятие не влияет на параметры внутренней среды помещения, то в этом случае уровень комфортности микроклимата не изменится ($U_{ком,2} = U_{ком,1} = U_{ком}$). При этом, если $U_{ком} = -0,3 \div 0,3$, то энергосберегающее мероприятие можно рекомендовать к внедрению, поскольку микроклимат в помещении можно охарактеризовать как «комфортный» (см. таблицу 2.3). При $U_{ком} < -0,3$ или $U_{ком} > 0,3$ – микроклимат в помещении не является комфортным и энергосберегающее мероприятие можно рекомендовать к внедрению только совместно с выполнением дополнительных мероприятий в целях повышения комфортности внутренней среды помещений объекта. Но в этом случае необходимо выполнить и коррекцию капитальных затрат на внедрение проекта энергосбережения с учетом этих дополнительных мероприятий.

Б. При недостатке теплоты в помещении уровни комфортности $U_{ком,1}$ и $U_{ком,2}$ имеют отрицательное значение. При этом, если $U_{ком,1} < U_{ком,2} < 0$, то внедрение энергосберегающего мероприятия повышает уровень комфортности микроклимата и проект рекомендуется к внедрению. При $U_{ком,2} < U_{ком,1}$ внедрение энергосберегающего мероприятия приводит к снижению уровня комфортности микроклимата и проект рекомендуется дополнить сопутствующими мероприятиями для ликвидации недостатков теплоты в помещении, что приводит к росту капитальных затрат на выполнение проекта энергосбережения.

В. При избытке теплоты в помещении уровни комфортности $U_{ком,1}$ и $U_{ком,2}$ имеют положительные значения. При этом, если $U_{ком,2} < U_{ком,1}$, то внедрение энергосберегающего мероприятия повышает уровень комфортности микроклимата и проект рекомендуется к внедрению. При $U_{ком,1} < U_{ком,2}$ внедрение энергосберегающего мероприятия приводит к увеличению избытка теплоты в помещениях здания и, следовательно, к снижению уровня комфортности микроклимата. Поэтому данное энергосберегающее мероприятие рекомендуется к внедрению только совместно с выполнением мер, повышающих комфортность микроклимата.

На третьем этапе выполняется расчет экономических показателей реализации проекта:

а) расчет простого срока окупаемости мероприятия

$$T_n = \frac{K_{\Sigma}}{П}, \quad (4.1)$$

где K_{Σ} – суммарные затраты на реализацию проекта, тыс. руб.; $П$ – поступление денежных средств от реализации проекта, тыс. руб.:

$$П = (\Delta Q \cdot T) + A, \quad (4.2)$$

где ΔQ – технический эффект от реализации энергосберегающего мероприятия (экономия энергии), Гкал/м³/кВт·ч и т.д.;

T – стоимость одной единицы энергоресурса, тыс. руб./ (Гкал/м³/кВт·ч и т.д.);

A – амортизационные отчисления (при их наличии), тыс. руб.

б) расчет чистого дисконтированного дохода (ЧДД) проекта (в случае единовременных капитальных затрат на реализацию проекта):

$$ЧДД = \sum_{t=1}^{T_{жс}} \frac{П_t}{(1+R)^t} - K_{\Sigma}, \quad (4.3)$$

где $T_{жс}$ – срок жизни проекта, лет; R – ставка дисконтирования; $П_t$ – поступление денежных средств от реализации проекта в период времени t ; тыс. руб.

Заметим, что энергосберегающее мероприятие рекомендуется к внедрению, если ЧДД имеет положительное значение ($ЧДД > 0$). Приемлемость срока окупаемости мероприятия определяет инвестор.

4.2 Анализ эффективности типовых энергосберегающих мероприятий для непроизводственных зданий

Рассмотрим использование предложенного метода оценки эффективности энергосберегающих мероприятий на примере типовых герметизирующих энергосберегающих мероприятий.

4.2.1 Энергосберегающее мероприятие по замене окон в деревянных переплетах на ПВХ-стеклопакеты

Объект – учебный корпус «В» Ивановского государственного энергетического университета имени В.И. Ленина, расположенный в г. Иваново. Планируется внедрение энергосберегающих мероприятий по замене окон в деревянных переплетах на ПВХ-стеклопакеты.

По результатам инструментального обследования при наружной температуре воздуха $T_n = -4,0$ °С средняя температура воздуха в помещениях объекта составила $T_e = 23,6$ °С, средняя относительная влажность $\varphi = 45$ %, средняя подвижность воздуха $w = 0,07$ м/с. Уровень комфортности микроклимата при указанных параметрах внутренней среды составляет $U_{ком,1} = 0,062$, что соответствует степени комфортности «комфортно».

Для оценки влияния энергосберегающего мероприятия по замене окон на уровень комфортности микроклимата в ПВК ANSYS Fluent была использована разработанная в главе 3 математическая модель процессов теплообмена при формировании микроклимата для одного из контрольных помещений объекта. Краевые условия были заданы по результатам инструментального обследования здания. Для окна в деревянном переплете средняя воздухопроницаемость составляет $6 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, приведенное сопротивление теплопередаче равно $0,4 (\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$ [98].

В таблице 4.1 приведены результаты расчета параметров микроклимата и концентрации компонентов воздушной смеси в контрольном помещении, а также результаты экспериментального определения соответствующих величин. Температурное поле в контрольном помещении показано на рисунке 4.1, а.

Таблица 4.1 – Параметры микроклимата в контрольном помещении до внедрения энергосберегающего мероприятия по замене окон

№ п/п	Характеристика внутренней среды	Расчет в ПВК ANSYS Fluent	Эксперимент
1	Средняя температура воздуха, T_v ($^{\circ}\text{C}$)	23,17	23,6
2	Средняя подвижность воздуха, w (м/с)	0,073	0,07
3	Относительная влажность воздуха, ϕ (%)	38%	45%
4	Концентрация CO_2 , ppm	493	532*

* – по результатам расчета по фактическому воздухообмену

Далее на математической модели в ПВК ANSYS Fluent был выполнен расчет параметров микроклимата в контрольном помещении объекта с учетом снижения воздухопроницаемости оконного блока при его замене на ПВХ-стеклопакет до $5 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ и увеличения приведенного сопротивления теплопередаче до $0,51 (\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$ [98]. Результаты расчета параметров микроклимата в помещении после внедрения энергосберегающего мероприятия приведены в таблице 4.2. Уровень комфортности микроклимата после замены окон в деревянных переплетах на энергосберегающие составит $U_{\text{ком},2(o)} = 0,353$ («тепло, легкий дискомфорт»). Распределение температуры воздуха в контрольном помещении приведено на рисунке 4.1, б.

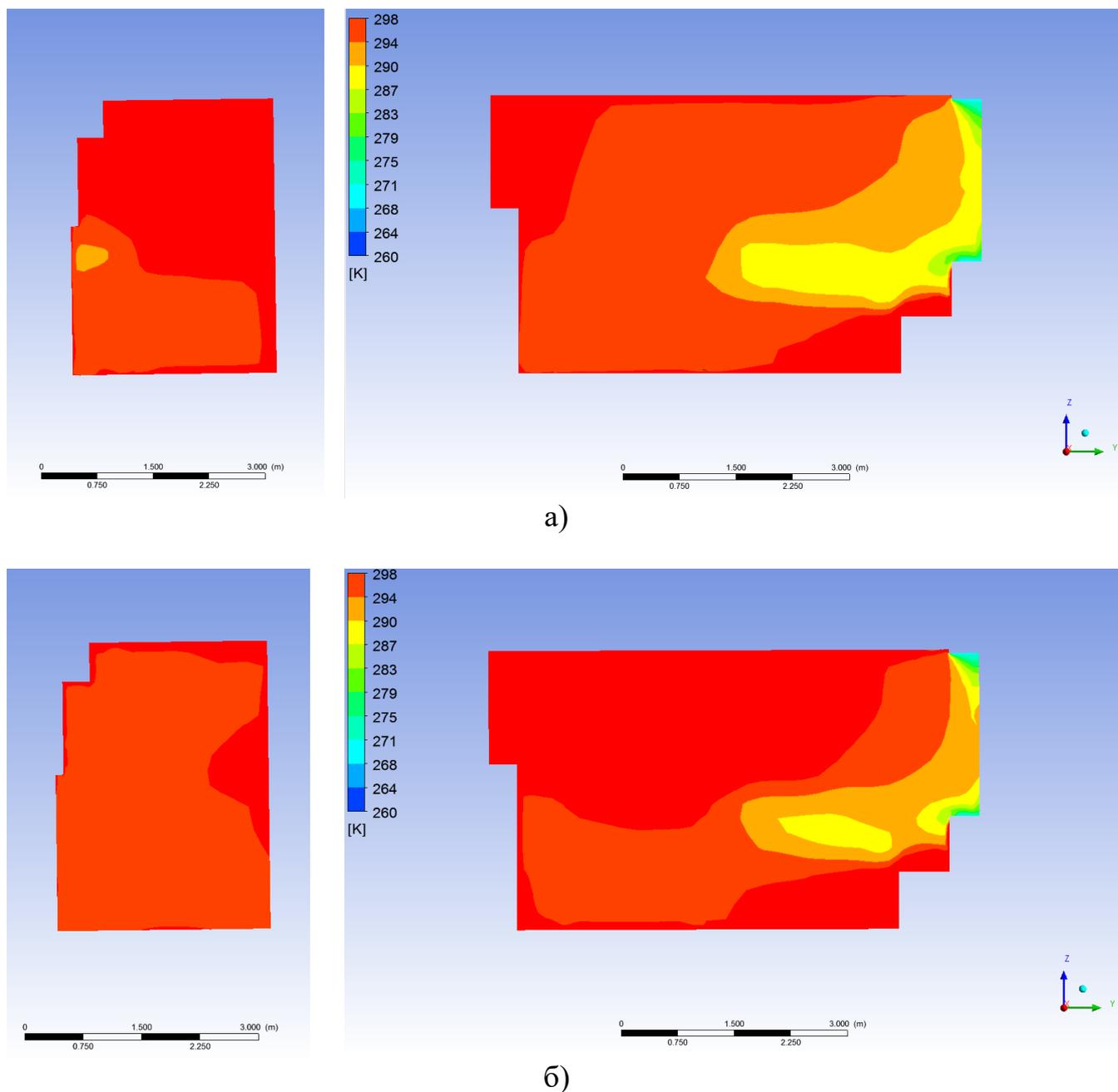


Рисунок 4.1 – Распределение температуры в контрольном помещении: а – до и б – после внедрения энергосберегающего мероприятия по замене окон

Таблица 4.2 – Параметры микроклимата в контрольном помещении после внедрения энергосберегающего мероприятия по замене окон

№ п/п	Характеристика внутренней среды	Расчет в ПК ANSYS Fluent
1	Средняя температура воздуха, T_e ($^{\circ}\text{C}$)	25,21
2	Средняя подвижность воздуха, w (м/с)	0,069
3	Относительная влажность воздуха, φ (%)	45%
4	Концентрация CO_2 , ppm	691

Для создания в помещении комфортной внутренней среды при минимальных энергозатратах необходимо в помещении поддерживать $U_{ком} = -0,1$, что может быть обеспечено при параметрах микроклимата, приведенных в таблице 4.3. Температурное поле, рассчитанное в ПБК ANSYS Fluent, в данном случае изображено на рисунке 4.2.

Таблица 4.3 – Параметры микроклимата в контрольном помещении после внедрения энергосберегающего мероприятия по замене окон и обеспечении комфортного микроклимата

№ п/п	Характеристика внутренней среды	Расчет в ПБК ANSYS Fluent
1	Средняя температура воздуха, T_e ($^{\circ}\text{C}$)	22,6
2	Средняя подвижность воздуха, w (м/с)	0,07
3	Относительная влажность воздуха, φ (%)	58
4	Концентрация CO_2 , ppm	691

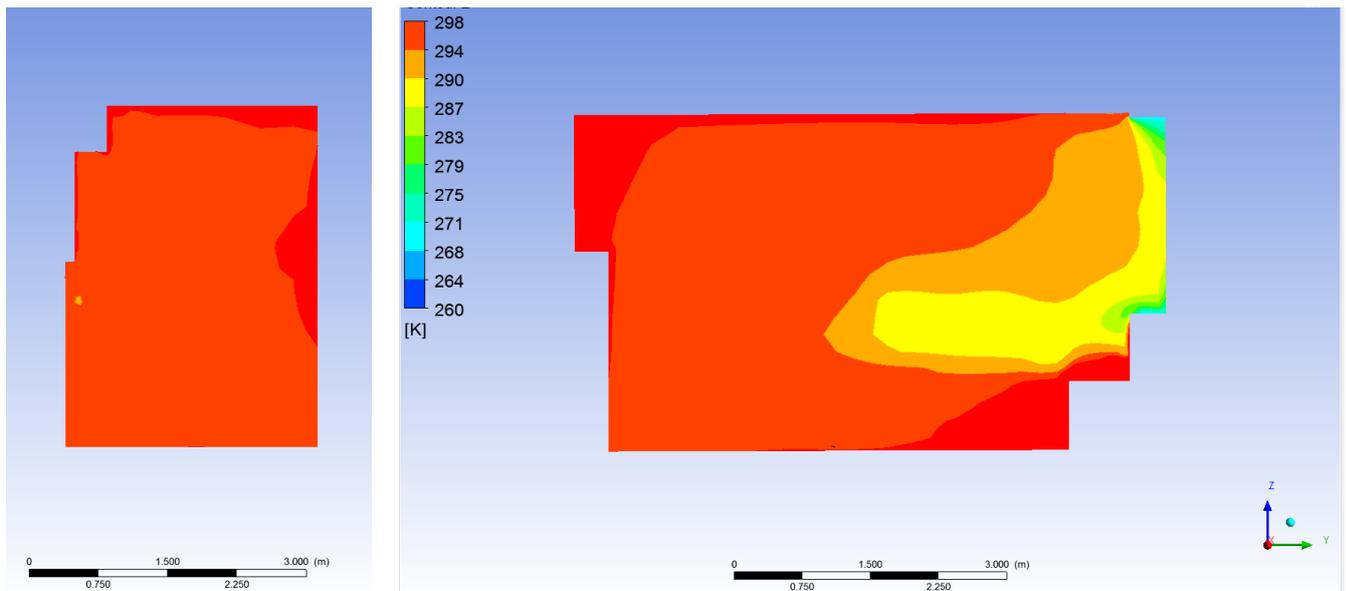


Рисунок 4.2 – Распределение температуры в контрольном помещении после внедрения энергосберегающего мероприятия и обеспечения комфортного микроклимата

Методом вариантных расчетов в ПБК ANSYS Fluent установлено, что для обеспечения параметров микроклимата, указанных в таблице 4.3 отопительная нагрузка должна быть снижена на 16%. На основе результатов математического моделирования выполнен расчет технических и экономических показателей энергосберегающего мероприятия, результаты которого приведены в таблице 4.4. В

учебном корпусе необходимо заменить 483 окна. По предварительной оценке в ценах 2017 г. капитальные затраты на внедрение проекта составят 5,796 млн. руб. За отопительный период учебный корпус потребляет на нужды отопления 1789,63 Гкал тепловой энергии в год. Средняя стоимость тепловой энергии для г. Иваново в 2017 г составляет 1883,5 руб./Гкал.

Таблица 4.4 – Технические и экономические показатели энергосберегающего мероприятия по замене окон

№ п/п	Показатель	Ед. изм.	Значение показателя	
			инженерный метод	расчет в ПБК ANSYS Fluent
1	Капитальные затраты на реализацию проекта	тыс. руб.	5796	
2	Сокращение потребления тепловой энергии	Гкал/год	84,35	286,34
3	Поступление денежных средств от реализации проекта	тыс.руб.	158,87	539,32
4	Простой срок окупаемости мероприятия	лет	36,48	10,7
5	ЧДД	тыс.руб.	-4927,495	-2847,59

За счет использования параметров внутренней среды, максимально приближенных к их действительным значениям при эксплуатации объекта, чистый дисконтированный доход (ЧДД) проекта увеличился на 40%, а простой срок окупаемости снизился в 3 раза по сравнению с инженерными методами оценки эффективности энергосберегающих мероприятий. При этом также обеспечивается создание комфортного микроклимата без дополнительных затрат энергоресурсов и капитальных вложений на внедрение сопутствующих мероприятий.

4.2.2 Энергосберегающее мероприятие по наложению тепловой изоляции на наружную поверхность стен

Объект – учебный корпус «В» Ивановского государственного энергетического университета имени В.И. Ленина, расположенный в г. Иваново. Планирует-

ся внедрение энергосберегающих мероприятий по нанесению тепловой изоляции на наружную поверхность ограждающих конструкций.

Результаты инструментального обследования микроклимата здания приведены в параграфе 4.2.1. работы. Уровень комфортности микроклимата до внедрения энергосберегающего мероприятия равен $U_{ком,1} = 0,062$ («комфортно»).

Наружные стены представляют собой железобетонные плиты, со слоем штукатурки и гипсокартона и воздушным зазором между ними. Приведенное сопротивление теплопередаче наружных стен до внедрения энергосберегающего мероприятия $R_1 = 1,25$ ($\text{м}^2 \cdot \text{К}$)/Вт, а удельные тепловые потери – $q_1 = 20,75$ Вт/ м^2 . Для выполнения требований по тепловой защите зданий [99, 101] сопротивление теплопередачи должно быть увеличено до $R_2 = 2,86$ ($\text{м}^2 \cdot \text{К}$)/Вт, что может быть осуществлено за счет наложения слоя минеральной ваты толщиной $\delta_{из} = 100$ мм при $\lambda = 0,072$ Вт/($\text{м} \cdot ^\circ\text{C}$). Удельные тепловые потери через наружные стены при этом уменьшаются до $q_2 = 8,71$ Вт/ м^2 .

В ПБК ANSYS Fluent выполнен расчет параметров микроклимата в помещении учебного корпуса после внедрения энергосберегающего мероприятия, результаты которого приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Параметры микроклимата в контрольном помещении после внедрения энергосберегающего мероприятия по наложению тепловой изоляции

№ п/п	Характеристика внутренней среды	Расчет в ПБК ANSYS Fluent
1	Средняя температура воздуха, T_a ($^\circ\text{C}$)	25,11
2	Средняя подвижность воздуха, w (м/с)	0,075
3	Относительная влажность воздуха, φ (%)	55%
4	Концентрация CO_2 , ppm	505

В результате внедрения энергосберегающего мероприятия по наложению тепловой изоляции уровень комфортности микроклимата изменится от $U_{ком,1} = 0,062$ («комфортно») до $U_{ком,2(c)} = 0,324$ («тепло, легкий дискомфорт»). Для создания комфортного микроклимата с минимальными энергозатратами ($U_{ком} = -0,1$) при сохранении подвижности воздуха равной 0,75 м/с в помещении необхо-

димо обеспечить температуру воздуха $T_e = 22,7$ °С. Путем вариантных расчетов в ANSYS Fluent установлено, что обеспечение требуемых параметров микроклимата возможно при снижении отопительной нагрузки на 21%. Капитальные затраты на реализацию энергосберегающего проекта, по предварительной оценке, составят 22,403 млн. руб. (в ценах 2017 г.). При использовании в расчете показателей эффективности проекта результатов математического моделирования, простой срок окупаемости составит 27 лет, а чистый дисконтированный доход -17,851 млн. руб. Таким образом, энергосберегающее мероприятие по наложению тепловой изоляции на наружные стены не целесообразно с экономической точки зрения, однако позволяет повысить комфортность микроклимата в помещениях учебного корпуса.

4.3 Упрощенный метод расчета температуры в помещении общественного здания после внедрения энергосберегающих мероприятий

Применение разработанной в диссертации детерминированной математической модели микроклимата для конкретного объекта с учетом его особенностей (геометрия, задание граничных условий и т.п.) – задача весьма трудоемкая, поэтому был предложен упрощенный инженерный метод расчета параметров микроклимата после выполнения процедуры энергосбережения для прогнозирования влияния энергосберегающего мероприятия на уровень комфортности микроклимата. Упрощенный метод позволяет выполнить только прогноз изменения температуры в рабочей зоне помещений объекта при заданных и постоянных относительной влажности и подвижности воздуха.

Упрощенный метод расчета микроклимата основан на определении температуры воздуха по уравнению теплового баланса помещения [85, 95, 96, 98]:

$$Q_n = Q_{nom}, \quad (4.4)$$

где Q_n – поступления теплоты в помещение, Вт;

Q_{nom} – тепловые потери помещения, Вт.

Поступление теплоты в здание или помещение определяют по выражению

$$Q_n = Q_{осв.} + Q_{эн} + Q_l + Q_c + Q_o, \quad (4.5)$$

где $Q_{осв.}$ – поступления теплоты в помещение от источников освещения, Вт;

$Q_{эн}$ – поступления теплоты в помещение от силовых электроустановок (бытовой техники), Вт;

Q_l – поступления теплоты от находящихся в помещении людей, Вт;

Q_c – инсоляция, Вт;

Q_o – поступления теплоты от источников теплоснабжения, Вт.

Поскольку основной объем экономии тепловой энергии достигается в отопительный период, когда продолжительность светового дня минимальна, инсоляцией в расчете можно пренебречь.

С учетом выражений (4.4) – (4.5), а также формул для расчета отдельных компонентов указанных выражений, приведенных в [95, 96, 98] температуру воздуха в помещении рассчитывают по формуле:

$$T_v = \frac{Q_{осв.} + Q_{эн} + Q_l + Q_o}{\sum_{i=1}^n \frac{F_i}{R_i} \left(1 + \sum_{k=1}^m \beta_k \right) + 0,34L_\phi} + T_n, \quad (4.6)$$

где F_i – расчетная площадь i -ой ограждающей конструкции, м²;

R_i – термическое сопротивление i -ой ограждающей конструкции, м²·К/Вт, которое определяется типом ограждающей конструкции;

T_n – расчетная температура наружного воздуха, °С;

β_k – добавочные потери теплоты в долях от основных теплопотерь на положение ограждающей конструкции, наличие окон и дверей;

L_ϕ – фактический приток наружного воздуха в помещение, который принимают равным воздухообмену помещения, м³/ч;

Исходные данные, необходимые для определения температуры воздуха в помещении по формуле (4.6) входят в перечень исходных данных при проведении энергетического обследования.

Предложенный упрощенный способ позволяет приближенно оценить температуру воздуха в помещении объекта при внедрении таких мероприятий как: замена источников освещения; замена электрооборудования на энергоэффективное; утепление ограждающих конструкций, в том числе замена окон, дверей и ворот, герметизация здания (при замене окон, дверей, наложении изоляции, уплотнении оконных и дверных блоков).

Для повышения скорости выполнения расчета упрощенный метод прогнозирования температуры воздуха в помещении реализован в виде компьютерной программы в среде Microsoft Office Excel «Прогнозирование температуры воздуха». Программа включает три блока: блок расчета составляющих уравнения теплового баланса помещения; блок прогнозирования температуры воздуха после изменения одного из компонентов уравнения теплового баланса за счет внедрения энергосберегающего мероприятия; блок справочной информации.

Приведем пример применения упрощенного инженерного метода прогнозирования температуры воздуха в помещении здания. Исходные данные для выполнения расчета приведены в таблице 4.6.

Уровень комфортности микроклимата при исходных данных, приведенных в таблице 4.6 составляет $U_{ком.,I} = 0,098$, что соответствует степени комфортности микроклимата «комфортно» (таб. 2.3).

В рассматриваемом помещении планируется произвести уплотнение оконных блоков, в результате чего воздухообмен помещения снизится на 15 %.

Для уплотнения используется 10 м силиконового шнура стоимостью 36 руб./м (с НДС). Капитальные затраты на реализацию мероприятия составят $K_{\Sigma} = 360$ руб.

Экономия тепловой энергии будет достигнута за счет снижения количества теплоты на нагрев холодного инфильтрируемого воздуха, поступающего в помещение. Сокращение потребления тепловой энергии за отопительный период ($\tau = 219$ сут для г. Иваново) составит 0,3 Гкал или, при тарифе на тепловую энергию 2924,25 руб./Гкал, – 877,3 руб.

воздуха на $2,96\text{ }^{\circ}\text{C}$ (с $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $25,96\text{ }^{\circ}\text{C}$). Уровень комфортности микроклимата после реализации энергосберегающих мероприятий будет равен $U_{\text{ком},2} = 0,55$. Степень комфортности микроклимата при этом изменится с «комфортно» на «жарко, дискомфорт».

Таким образом, энергосберегающее мероприятие способствует снижению комфортности микроклимата объекта и рекомендуется к внедрению с дополнительными мерами, обеспечивающими устранение избытков теплоты, например, снижение отопительной нагрузки на 17% (с $665,65\text{ Вт}$ до $553,4\text{ Вт}$).

4.4 Выбор расчетных параметров микроклимата при оценке эффективности энергосберегающих мероприятий

Опыт проведения энергетических обследований объектов непромышленного назначения показывает, что определяющим фактором при регулировании параметров микроклимата в помещениях является комфортность внутренней среды для человека. По этой причине фактическая температура воздуха может значительно отличаться от значений, рекомендованных нормативными документами и, как следствие, от значений, используемых при оценке энергетической и экономической эффективности энергосберегающих мероприятий.

Некомфортно низкую температуру воздуха человек компенсирует установкой дополнительного оборудования в виде электронагревателей различной модификации, некомфортно высокую – установкой сплит-систем или отключением отопительных приборов централизованной системы отопления, что также отрицательно сказывается на энергетической эффективности систем энергоснабжения объекта и искажает показатели энергетической эффективности планируемых к внедрению энергосберегающих мероприятий.

При оценке эффективности энергосберегающих мероприятий, связанных с системами отопления, вентиляции и кондиционирования зданий, актуальной задачей является выбор расчетных параметров внутренней среды. Рекомендации по выбору

расчетных параметров внутреннего воздуха приведены в зависимости от назначения объекта в ГОСТ 30494, ГОСТ 12.1.005, СанПин 2.1.2.2645 и СанПин 2.2.548.

Согласно своду правил СП 60.13330.2012 "Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха", в зданиях жилых, общественных и административных диапазон возможных значений параметров микроклимата определяется назначением помещения и, как следствие необходимостью поддерживать либо оптимальные, либо допустимые параметры микроклимата по ГОСТ 30494 [27]. При отоплении и вентиляции помещений, согласно рекомендациям СП 60.13330.2012, параметры внутренней среды следует принимать в пределах допустимых значений, а при кондиционировании – в пределах оптимальных. Рекомендуемые значения параметров микроклимата для проектирования систем отопления, вентиляции и кондиционирования жилых, общественных и административных зданий приведены в ГОСТ 30494 «Здания жилые и общественные» [27]. Например, для помещения 2-й категории (в которых люди заняты умственным трудом, учебой) допустимая температура воздуха составляет 18-23 °С при допустимой влажности не более 60 % и подвижности воздуха менее 0,3 м/с. При оценке эффективности энергосберегающих мероприятий методические материалы, посвященные проблеме экономического обоснования проектов, рекомендуют использовать минимальную температуру указанного диапазона (18 °С) [14, 72].

Для повышения точности оценки эффективности энергосберегающих мероприятий предложено в качестве расчетных значений параметров микроклимата использовать значения температуры, влажности и подвижности воздуха в помещении, соответствующие комфортному состоянию человека в помещении.

В качестве примера проанализируем влияние расчетных параметров внутренней среды помещения на показатели энергетической и экономической эффективности энергосберегающего мероприятия по замене деревянных окон на ПВХ-стеклопакеты.

Объект – учебное заведение, расположенное в г. Иваново. Здание оборудовано 483 деревянными оконными блоками в спаренных переплетах с нормативным сопротивлением теплопередаче 0,4 м²·°С/Вт и воздухопроницаемостью 6

кг/(м²·ч) [96, 98]. Планируется заменить указанные конструкции ПВХ–стеклопакетами с нормативным сопротивлением теплопередаче 0,51 м²·°С/Вт и воздухопроницаемостью 6 кг/(м²·ч) [96, 98].

Экономия тепловой энергии будет достигнута как за счет снижения тепловых потерь за счет теплопередачи через поверхность окон, так и за счет уменьшения инфильтрации.

В таблице 4.7 приведены характеристики технического и экономического эффекта, достигаемого за счет реализации энергосберегающего мероприятия, для случая **А**, когда в качестве расчетных параметров внутренней среды использована нижняя граница оптимальных значений для помещений 2 категории по ГОСТ 30494 [27] (19 °С), и **Б** – в качестве расчетной температуры внутреннего воздуха рассмотрена фактическая температура, полученная в результате инструментального обследования объекта (23,5 °С). Стоит отметить, что фактическая температура воздуха в помещениях соответствует комфортным условиям (комфортная температура для помещений 2 категории – 23,2 °С).

Таблица 4.7 – Технические и экономические показатели энергосберегающего проекта по замене оконных блоков

№ п/п	Наименование показателя	Размерность	Вариант А	Вариант Б
1	Капитальные затраты на реализацию проекта	тыс. руб.	5796	
2	Сокращение потерь тепловой энергии, в том числе	Гкал/год	120,2	143,8
2.1	за счет снижения теплопередачи		39,4	47,1
2.2	за счет снижения инфильтрации		80,8	96,7
3	Поступление финансовых средств от реализации проекта	тыс. руб.	191,86	229,48
4	Простой срок окупаемости мероприятия	лет	30,2	25,3
5	ЧДД	тыс. руб.	-4737,53	-4529,98

Таким образом, использование комфортных для человека параметров микроклимата при оценке эффективности энергосберегающих мероприятий повышает точность расчета показателей реализации проекта, как технических, так и эко-

номических. Например, поступление денежных средств для рассмотренного энергосберегающего мероприятия увеличится на 15%.

4.5 Компьютерная программа «Определение уровня и степени комфортности помещений жилых, общественных и административных зданий»

Разработанный и представленный во второй главе диссертационной работы метод оценки комфортности микроклимата зданий непроизводственного назначения предполагает большой объем вычислений, поэтому он был реализован в виде компьютерной программы «Определение уровня и степени комфортности помещений жилых, общественных и административных зданий» (УСК01), которую было получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ (№ 2016615407 от 23 мая 2016 г.).

При помощи данной компьютерной программы можно рассчитать:

- уровень и степень комфортности микроклимата для помещений зданий непроизводственного назначения по известному типу работ и заданным параметрам внутренней среды с учетом пола и возраста находящихся в помещении людей;
- комбинации параметров микроклимата, которые обеспечивают наиболее комфортные для человека условия при уровне комфортности $-0,1 < U_{\text{ком}} < 0,1$;
- комбинации параметров микроклимата, которые обеспечивают заданную степень комфортности микроклимата ($U_{\text{ком}} < -0,1$ или $U_{\text{ком}} > 0,1$) в случае, если особенности эксплуатации систем энергоснабжения здания не способны обеспечить наиболее комфортные для человека условия.

Компьютерная программа УСК01 для определения уровня и степени комфортности микроклимата реализована в среде MathCad и включает в себя следующие блоки:

- блок 1 – определение типа и характеристик работ, выполняемых в помещении;
- блок 2 – ввод экспериментальных значений параметров микроклимата: температуры воздуха, относительной влажности и подвижности воздуха; температур

ограждающих поверхностей, характеристик воздухообмена помещения (при их наличии);

блок 3 – расчет составляющих уравнения теплового баланса человека в помещении и определение коэффициента комфорта теплового состояния человека K_{TK} ;

блок 4 – расчет поправок на радиационное охлаждение (ε_1), асимметрию радиационного излучения (ε_2) и коэффициента качества воздушной среды ($K_{КС}$);

блок 5 – расчет уровня комфортности и определение степени комфортности микроклимата в помещении;

блок 6 – построение номограмм для выбора параметров микроклимата, обеспечивающих заданный уровень комфортности.

После расчета по программе УСК01 выполняется анализ соответствия уровня комфортности микроклимата требуемому значению. Наиболее благоприятные для человека условия реализуются при нулевом уровне комфортности в случае $U_{ком} = 0$. При несоответствии уровня комфортности заданному значению расчетным путем или при помощи номограмм, построенных компьютерной программой, выполняется процедура определения комбинации параметров микроклимата, при которых обеспечивается требуемый тепловой, влажностный и воздушный режимы в помещении.

На рисунке 4.3 приведена блок-схема компьютерной программы.

Рассмотрим пример использования компьютерной программы УСК01 для условий, рассмотренных в разделе 2.5 работы.

В разделе 2.5 диссертации приведен пример расчета уровня комфортности микроклимата для помещения учебной аудитории ВУЗа. Исходные данные для расчета уровня комфортности: метоболистическая теплота $q_{MT} = 93 \text{ Вт/м}^2$; КПД механической работы $\eta = 0$; ориентировочное термическое сопротивление одежды $R_o = 0,5 \text{ кло}$), а также заданных параметрах микроклимата (температура воздуха $T_v = 23 \text{ }^\circ\text{C}$; относительная влажность воздуха $\varphi = 45 \text{ \%}$; температура поверхности одежды $T_o = 29 \text{ }^\circ\text{C}$; подвижность воздуха $w = 0,05 \text{ м/с}$; минимальная температура ограждающих поверхностей $T_{w,min} = 18 \text{ }^\circ\text{C}$, максимальная температу-

ра ограждающих поверхностей $T_{w,max} = 22 \text{ }^{\circ}\text{C}$; концентрация углекислого газа в помещении $C_B = 350 \text{ ppm}$; концентрация углекислого газа в наружном воздухе $C_{oc} = 30 \text{ ppm}$) уровень комфортности микроклимата составил $U_{ком} = -0,0639$, что соответствует степени комфортности микроклимата «комфортно», так как значение $U_{ком}$ лежит в интервале $-0,1 < U_{ком} < 0,1$.

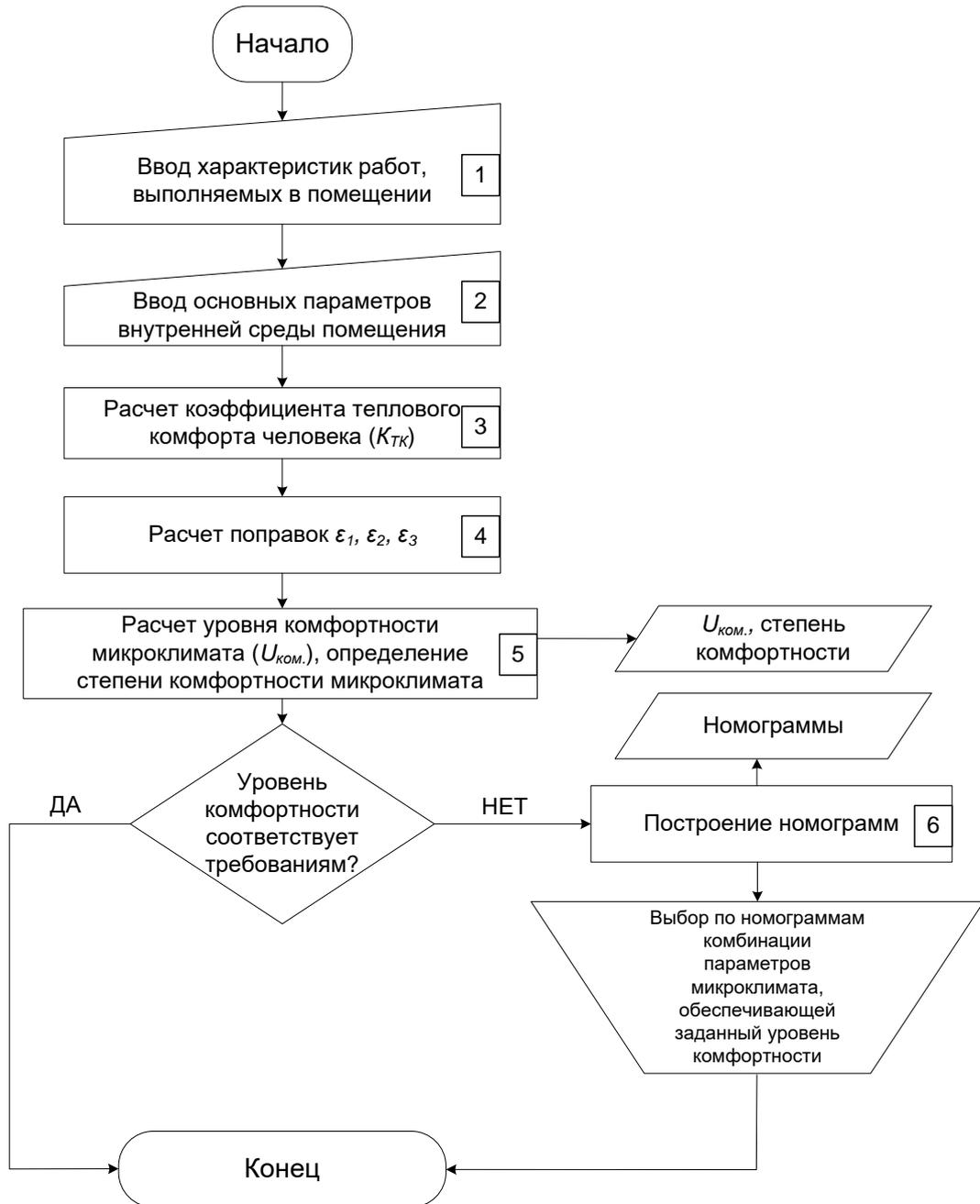


Рисунок 4.3 – Блок-схема компьютерной программы УСК01 «Определение уровня и степени комфортности помещений жилых, общественных и административных зданий»

При помощи компьютерной программы УСК01 определяют комбинацию параметров микроклимата, соответствующих наиболее комфортному микроклимату ($U_{ком} \rightarrow 0$), как расчетным методом, так и графическим (по номограммам). В таблице 4.8 приведены возможные комбинации параметров внутренней среды, обеспечивающие комфортный микроклимат ($-0,1 < U_{ком} < 0,1$).

Таблица 4.8 – Комбинации параметров микроклимата, обеспечивающие уровень комфортности в диапазоне $-0,1 < U_{ком} < 0,1$ (для примера в разделе 2.5)

№ п/п	$T_e, ^\circ\text{C}$	$\phi, \%$	$w, \text{м/с}$	Диапазон параметров микроклимата в соответствии с ГОСТ 30494					
				по T_e	по ϕ	по w			
1	22*	15	$0 \div 0,017$	ДП**	ОП***	ОП			
		30	$0 \div 0,018$						
		45	$0 \div 0,019$						
		60	$0 \div 0,019$						
2	23	15	$0 \div 0,064$						
		30	$0 \div 0,066$						
		45	$0 \div 0,068$						
		60	$0 \div 0,069$						
3	24	15	$0,05 \div 0,166$				за границей ДП (0,3 м/с)	ОП***	Верхний предел диапазона за границей ДП (0,3 м/с)
		30	$0,052 \div 0,169$						
		45	$0,053 \div 0,172$						
		60	$0,055 \div 0,175$						
4	25	15	$0,172 \div 0,402$						
		30	$0,175 \div 0,409$						
		45	$0,179 \div 0,415$						
		60	$0,183 \div 0,422$						

* – Заданный уровень комфортности не может быть обеспечен при температуре воздуха ниже 22°C (для условий данного примера);

** – допустимые параметры микроклимата по ГОСТ 30494 (ДП);

*** – оптимальные параметры микроклимата по ГОСТ 30494 (ОП).

Анализ результатов расчета, представленных в таблице 4.8, показывает, что относительная влажность воздуха незначительно влияет на комфортность микроклимата (при постоянной температуре воздуха и изменении относительной влажности от 15 до 60% подвижность воздуха изменяется не более, чем на 5%, при обеспечении комфортного микроклимата).

Результаты расчета по определению комбинаций параметров внутренней среды, обеспечивающих комфортный микроклимат могут быть представлены

графически. На рисунках 4.4 и 4.5 представлены зависимости для определения параметров микроклимата в помещении, обеспечивающих уровень комфортности микроклимата $U_{ком} = 0$ (степень комфортности «комфорт»), а также область допустимых параметров микроклимата (соответственно подвижности и температуры воздуха на рис. 4.4 и относительной влажности и температуры воздуха на рис. 4.5).

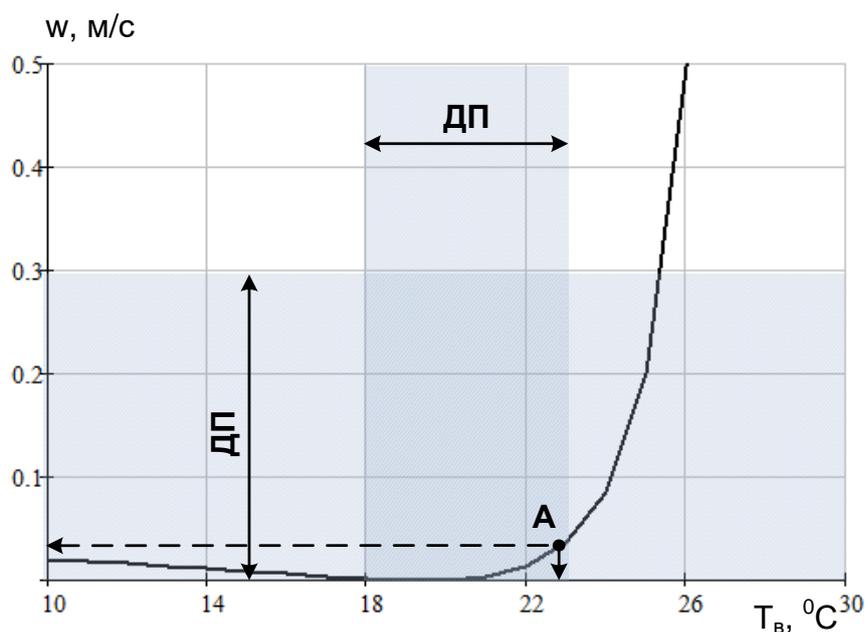


Рисунок 4.4 – Комфортная температура и подвижность воздуха (при относительной влажности воздуха $\varphi = 45\%$): ДП – область допустимых значений температуры и подвижности воздуха для холодного периода года в помещениях 2-ой категории по ГОСТ – 30494 [27]

Точки **A** и **B** на рисунках показывают возможное сочетание параметров микроклимата, одновременно обеспечивающее уровень комфортности $U_{ком} = 0$ и допускаемое нормами для общественных зданий [27]: для точки **A** – $T_{г} = 22,7^{\circ}C$, $w = 0,7$ м/с (при относительной влажности воздуха $\varphi = 45\%$) и для точки **B** – $T_{г} = 19,9^{\circ}C$; $\varphi = 27\%$ (при подвижности воздуха $w = 0,05$ м/с).

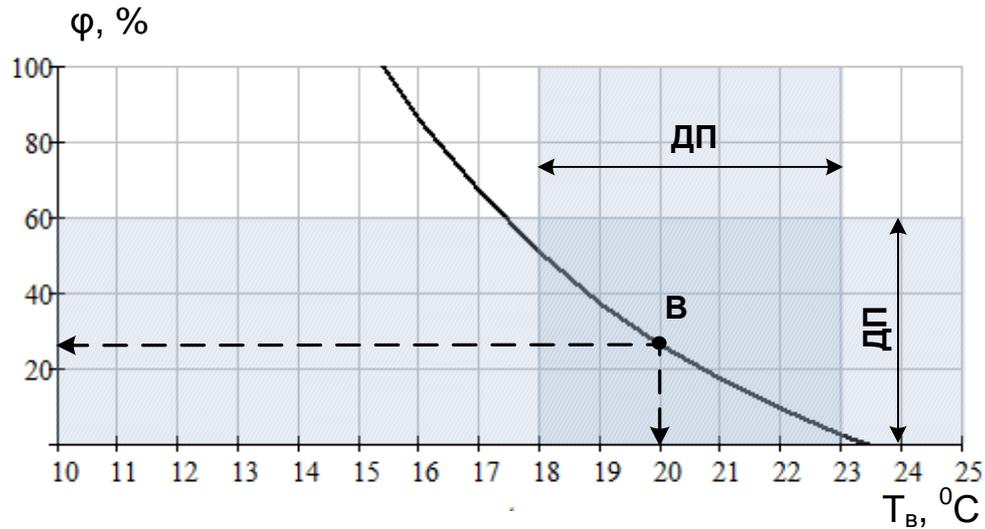


Рисунок 4.5 – Комфортная температура и относительная влажность воздуха (при подвижности воздуха $w = 0,05$ м/с): ДП – область допустимых значений температуры и влажности воздуха для холодного периода года в помещениях 2-ой категории по ГОСТ – 30494 [27]

4.6 Графический способ определения уровня комфортности микроклимата

Для оперативного определения уровня комфортности микроклимата при проведении инструментального обследования и отсутствии вычислительной техники может быть использован графический способ.

Уровень комфортности микроклимата в помещении зависит от коэффициента теплового комфорта ($K_{ТК}$) и коэффициента качества воздушной среды ($K_{КС}$) (см. формулу 2.1). На рисунках 4.6, 4.7 и 4.8 приведены примеры номограмм для определения коэффициента теплового комфорта человека $K_{ТК}$ по известным значениям температуры воздуха, относительной влажности и подвижности воздуха и коэффициента качества воздушной среды $K_{КС}$ с учетом объема помещения, количества присутствующих в нем людей и кратности воздухообмена для здания непроизводственного назначения. Построение номограмм для $K_{ТК}$ выполняют для каждого объекта в отдельности, поскольку указанная величина зависит от типа работ, выполняемых в помещении здания, а также типа одежды присутствующих в помещении людей. На рисунке 4.6 приведена номограмма для определения коэффициента теплового комфорта для офисного помещения. Метаболическая

теплоты обычной офисной работы (печать текста, заполнение бланков, работа с вычислительной техникой и т.д. составляет $q_{MT} = 58 \text{ Вт/м}^2$, коэффициент полезного действия механической работы $\eta = 0$, относительная подвижность человека – $w_0 = 0,05 \text{ м/с}$ (см. табл. Б.1 и Б.2 Приложения).

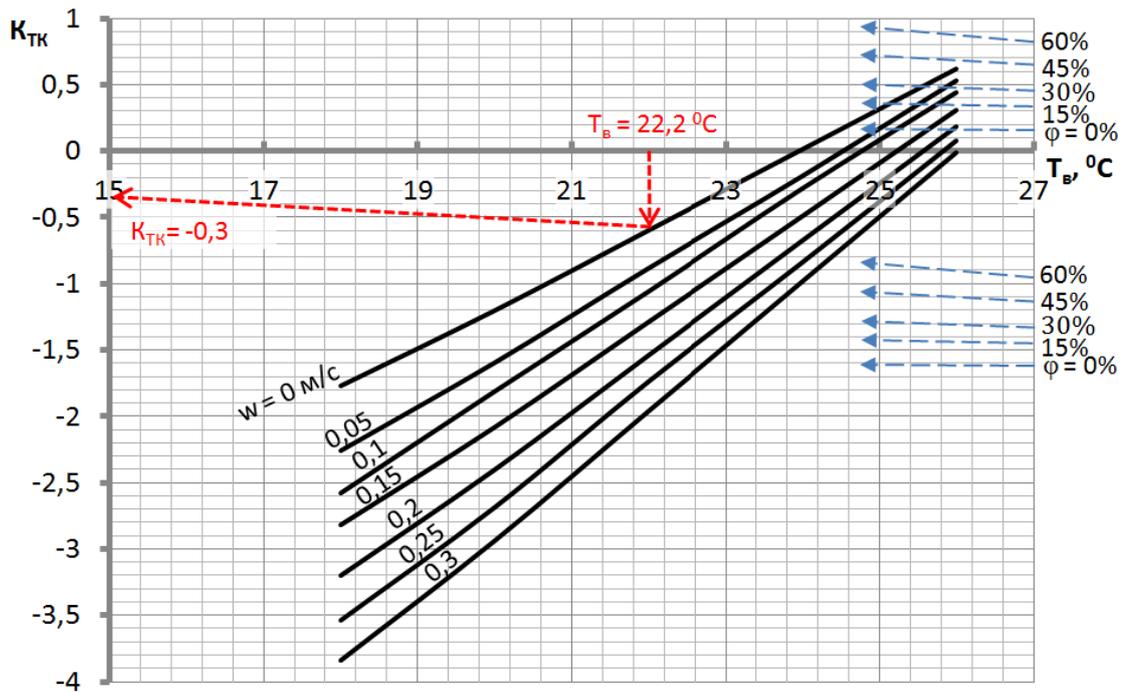


Рисунок 4.6 – Номограмма для определения коэффициента теплового комфорта офисного помещения ($q_{MT} = 58 \text{ Вт/м}^2$, $\eta = 0$, $w_0 = 0,05 \text{ м/с}$, $T = 22,2 ^\circ\text{C}$, $w = 0 \text{ м/с}$, $\phi = 45 \%$)

Исходной информацией для определения коэффициента K_{TK} является температура воздуха $T_{в}, ^\circ\text{C}$ (горизонтальная ось, рис. 4.6), подвижность воздуха в помещении w , м/с (сплошные наклонные линии, рис. 4.6) и относительная влажность воздуха в помещении ϕ , % (штриховые наклонные линии, рис. 4.6).

На рисунке 4.6 тонкими штриховыми линиями показан пример использования номограммы для определения коэффициента теплового комфорта в офисном помещении при следующих условиях: $T_{в} = 22,2 ^\circ\text{C}$; $w = 0 \text{ м/с}$; $\phi = 45 \%$. Для нахождения K_{TK} необходимо выбрать заданное (измеренное) значение температуры на оси абсцисс и, проведя перпендикуляр через заданную точку, найти его пересечение со сплошной наклонной линией, соответствующей известному значению скорости воз-

духа в помещении. Далее, проведя прямую линию параллельно штриховой $\phi = \text{const}$, на оси ординат определяют значение коэффициента комфортности теплового состояния человека. Для условий примера на рисунке 4.6 получаем $K_{TK} = -0,3$.

На рисунке 4.7 приведена номограмма для определения коэффициента комфортности теплового состояния человека в учебной лаборатории при $q_{MT} = 93 \text{ Вт/м}^2$ (выполнение лабораторной работы), $\eta = 0$, $w_0 = 0 \text{ м/с}$ (см. табл. Б.1 и Б.2 Приложения). Для условий $T_g = 22,2 \text{ }^\circ\text{C}$; $w = 0 \text{ м/с}$; $\phi = 45 \%$ получаем значение коэффициента теплового комфорта $K_{TK} = -0,23$.

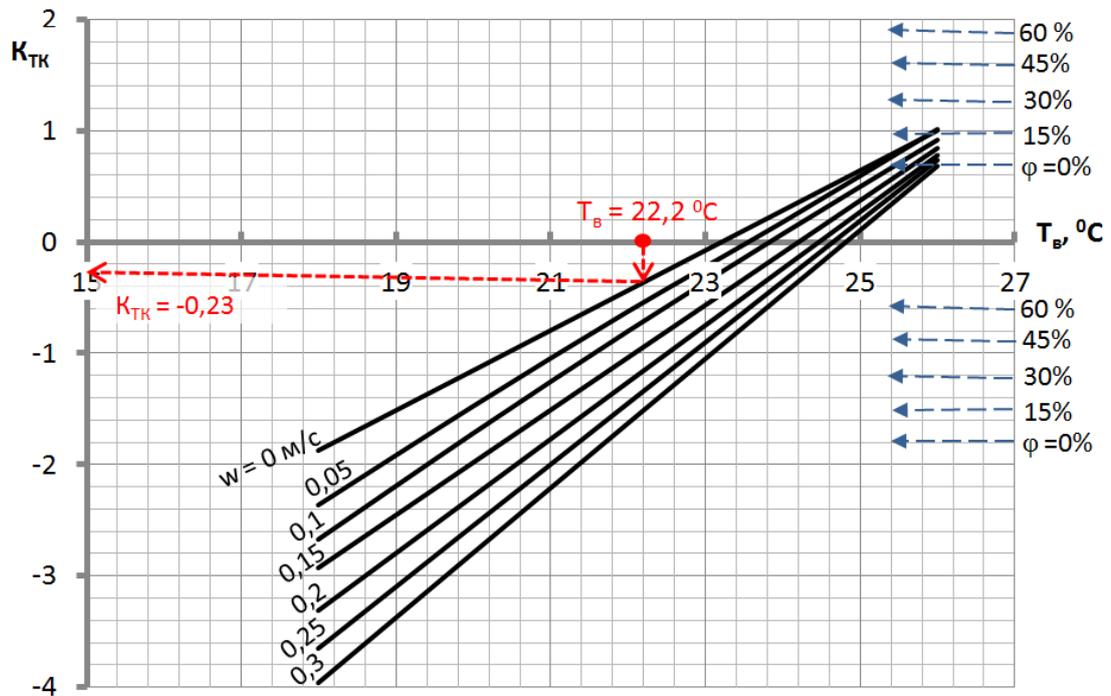


Рисунок 4.7 – Номограмма для определения коэффициента теплового комфорта помещения учебной лаборатории ($q_{MT} = 93 \text{ Вт/м}^2$, $\eta = 0$, $w_0 = 0 \text{ м/с}$)

На рисунке 4.8 приведена номограмма для определения коэффициента теплового комфорта K_{TK} помещений, предназначенных для спортивных занятий (гимнастики) при $q_{MT} = 210 \text{ Вт/м}^2$, $\eta = 0,05$, $w_0 = 0,5 \text{ м/с}$ (см. табл. Б.1 и Б.2 Приложения). Для условий $T_g = 22,2 \text{ }^\circ\text{C}$; $w = 0 \text{ м/с}$; $\phi = 45 \%$ получаем значение $K_{TK} = 0,3$.

Анализ рисунков 4.6, 4.7 и 4.8 показывает, что при снижении теплопродукции человека (метаболической теплоты) комфортные параметры микроклима-

та сдвигаются в область более «теплых» значений (высокой относительной влажности, низкой подвижности воздуха и относительно высокой температуры), что логично, так как для соблюдения теплового баланса организма человека необходимо снизить его теплообмен с окружающей средой за счет увеличения относительной влажности воздуха, повышения температуры и снижения подвижности.

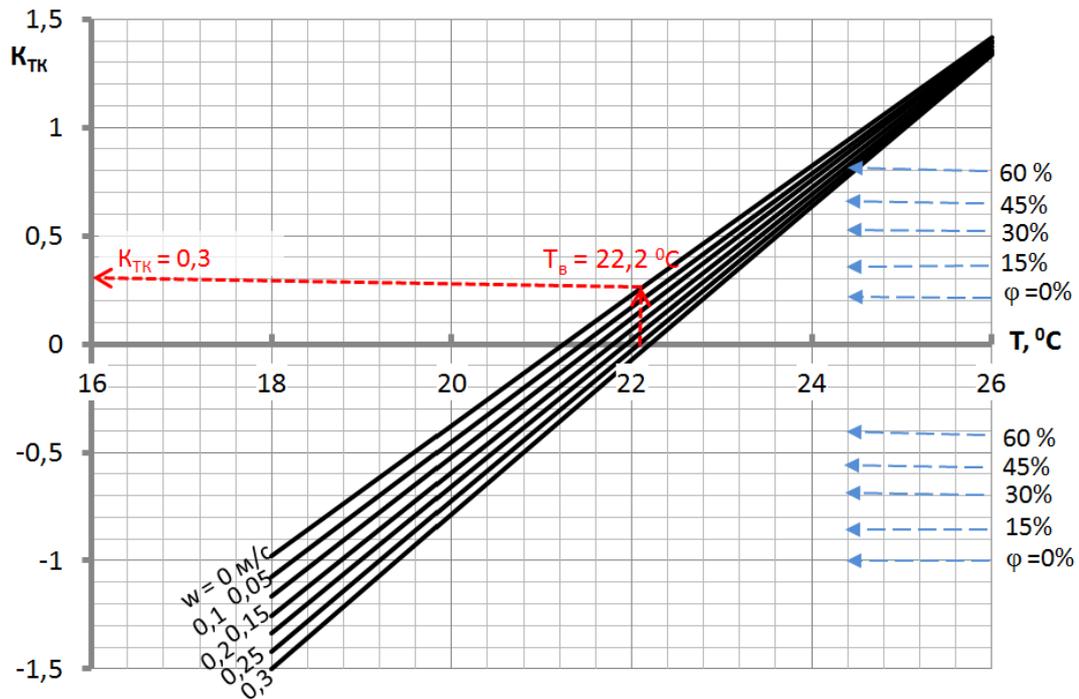


Рисунок 4.8 – Номограмма для определения коэффициента теплового комфорта помещения, предназначенного для спортивных занятий (гимнастики) ($q_{MT} = 210 \text{ Вт/}^{\circ}\text{C}$, $\eta = 0,05$, $w_0 = 0,5 \text{ м/с}$)

Данная закономерность может быть использована при регулировании отопительной нагрузки зданий непромышленного назначения в течение дня, если в разные периоды рабочего времени в них выполняют разные виды работ.

Номограммы, аналогичные представленным на рисунках 4.6, 4.7 и 4.8, могут быть разработаны для любого типа помещений и любого типа работ.

На рисунке 4.9 представлены номограммы для учета поправок на радиационное охлаждение и асимметрию тепловых потоков, снижающих комфортность теплового состояния человека.

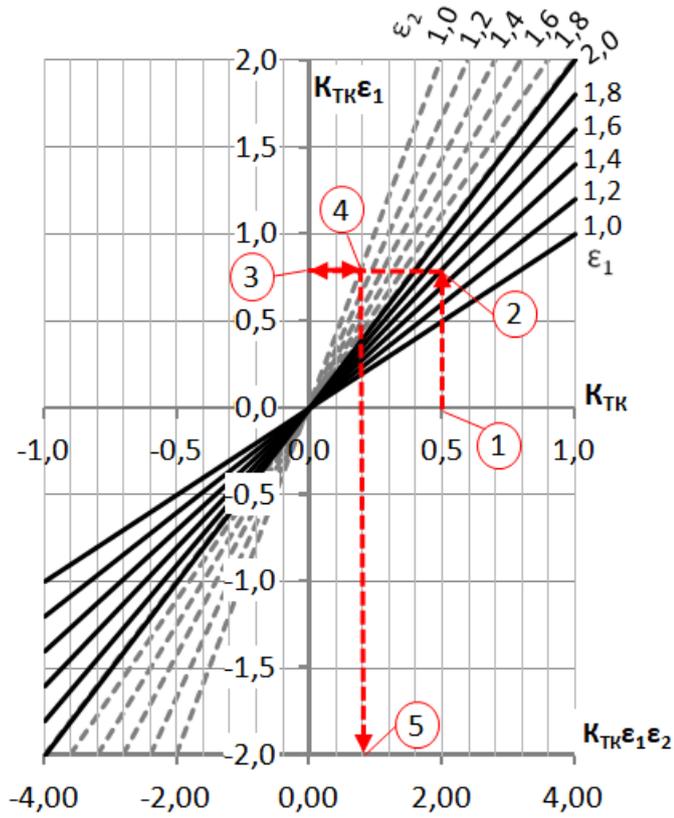


Рисунок 4.9 – Номограмма для учета поправок ϵ_1 и ϵ_2

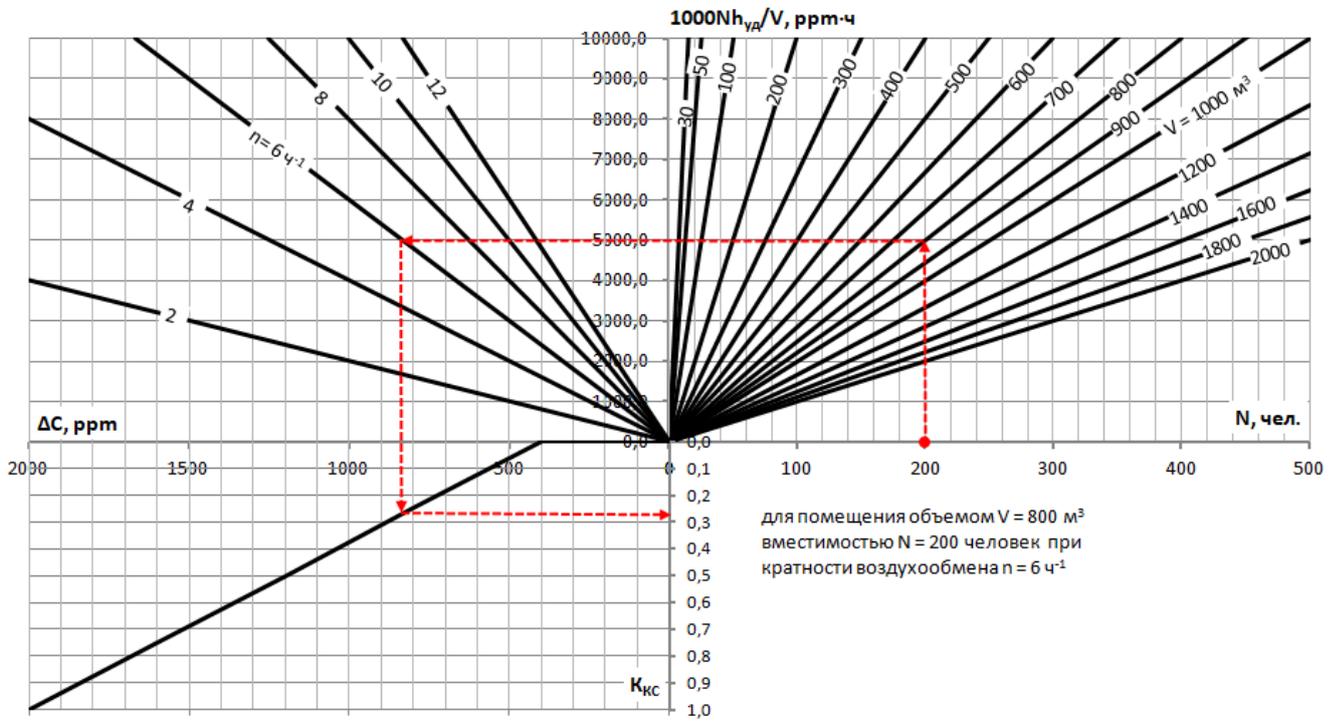


Рисунок 4.10 – Номограмма для определения коэффициента качества воздушной среды

На рисунке 4.10 приведена номограмма для определения коэффициента качества воздушной среды $K_{КС}$. Анализ рисунка 4.10 показывает, что качество воздушной среды ухудшается при увеличении числа присутствующих в обследуемом помещении людей и при снижении кратности воздухообмен за счет роста концентрации углекислого газа в воздухе.

Номограммы, представленные на рисунках 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 и 4.10, обеспечивают возможность оперативного определения уровня и степени комфортности микроклимата помещений при проведении инструментального обследования

Графический способ определения уровня комфортности микроклимата может быть использован при оценке целесообразности внедрения энергосберегающих мероприятий, а также при оценке эффективности работы систем энергоснабжения здания, формирующих микроклимат объекта.

4.6 Разработка концепции измерительно-вычислительного комплекса для контроля комфортности микроклимата

Для определения уровня комфортности микроклимата в помещении должны быть известны такие параметры внутренней среды, как температура воздуха, относительная влажность и подвижность воздуха, температура ограждающих поверхностей помещения, температура нагретых или охлажденных поверхностей в помещении, концентрация углекислого газа в воздухе помещения. Для оперативного определения уровня комфортности микроклимата разработана принципиальная схема мобильного измерительно-вычислительного комплекса, концепция которого приведена на рисунке 4.11.

Измерительно-вычислительный комплекс должен быть оборудован комплектом датчиков для измерения необходимых для расчета уровня комфортности микроклимата величин, характеризующих внутреннюю среду объекта.

Для оцифровки аналоговых сигналов, поступающих от датчиков, используется преобразователь. Процессор, получив значения параметров внутренней среды помещения от преобразователя, а также заданные пользователем характери-

стики работ, выполняемых в помещении, использует программу УСК01 для расчета уровня комфортности микроклимата и последующего определения степени комфортности микроклимата.

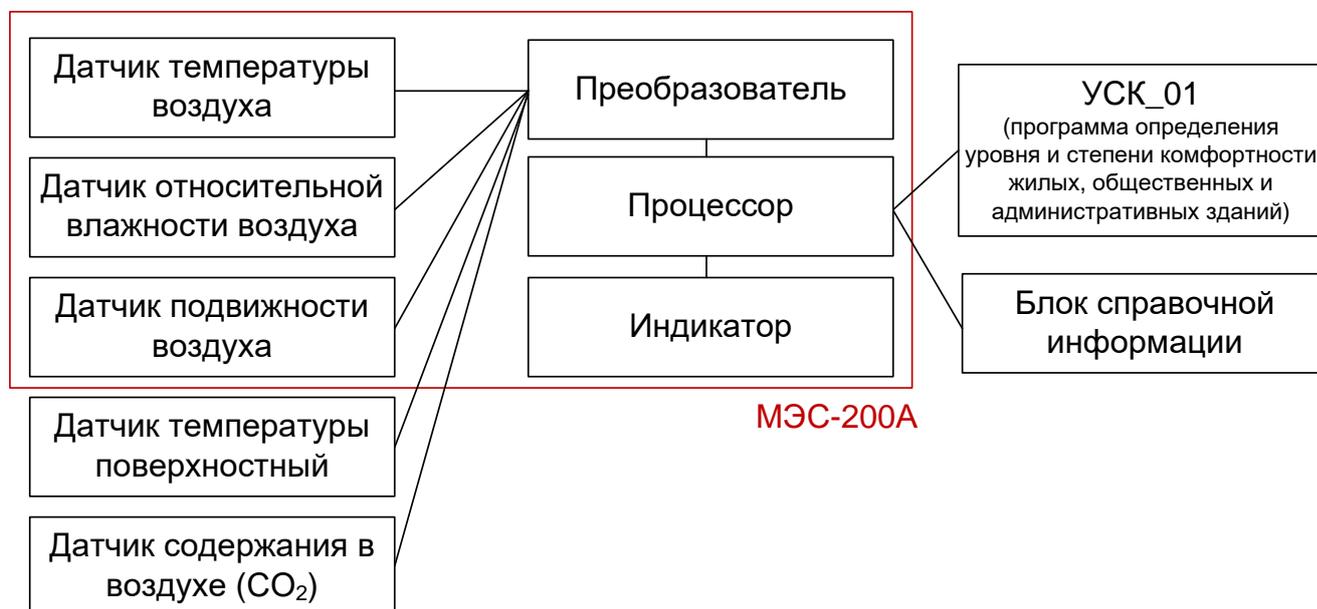


Рисунок 4.11 – Принципиальная схема измерительно-вычислительного устройства для определения уровня комфортности микроклимата объектов непромышленного назначения

При помощи измерительно-вычислительного комплекса можно решить и обратную задачу по расчету необходимых параметров внутренней среды для заданного уровня комфортности микроклимата.

В настоящее время измерительно-вычислительный комплекс реализован в виде метеометра МЭС-200А и переносного персонального компьютера (ноутбука) с установленной компьютерной программой «Определение уровня и степени комфортности помещений жилых, общественных и административных зданий (УСК01)» в качестве процессора и индикатора.

Метеометр МЭС-200А позволяет измерять атмосферное давление, относительную влажность воздуха, температуру воздуха, скорость воздушного потока, параметр тепловой нагрузки среды ТНС-индекс и концентрацию токсичных газов как внутри помещения, так и за его пределами. Измерительное устройство состоит из блока электроники и сменных измерительных щупов (рис. 4.12) [71].

Метеометр МЭС-200А позволяет оценить уровень комфортности микроклимата в первом приближении, без учета поправок на радиационное охлаждение, асимметрию радиационного излучения и качество воздушной среды ($K_{КС} = 0$ и $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 1$). В этом случае уровень комфортности микроклимата равен коэффициенту теплового комфорта ($U_{ком} = K_{ТК}$).

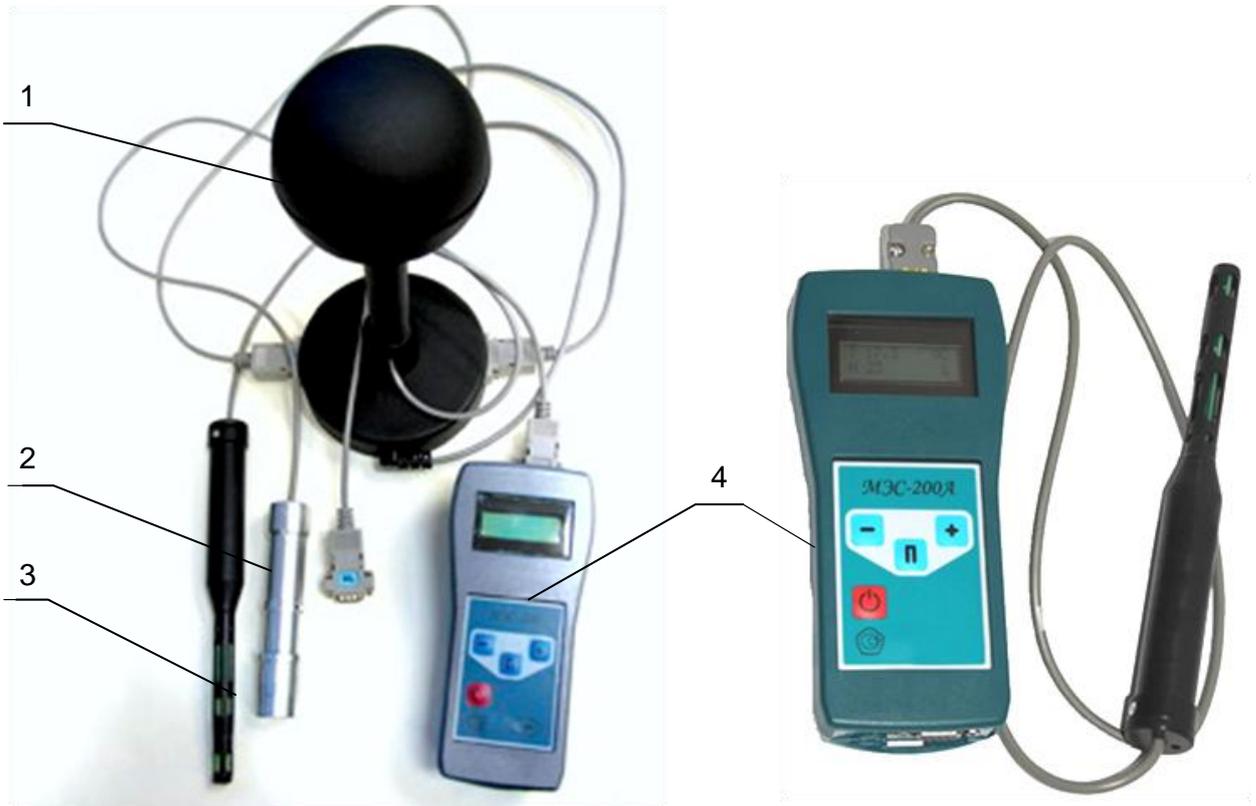


Рисунок 4.12 – Метеометр МЭС 200А: 1, 2, 3 – измерительные щупы; 4 – блок электроники

В таблице 4.9 приведены результаты предварительной оценки уровня комфортности микроклимата с использованием МЭС-200А и компьютерной программы УСК01 для разного типа работ.

Метеометр используют для измерения температуры, относительной влажности и подвижности воздуха, которые являются исходными данными для предварительной оценки уровня комфортности микроклимата.

В целях определения точного значения $U_{ком}$ действующий измерительно-вычислительный комплекс (МЭС-200А + ноутбук) должен быть дополнен датчиками для определения температуры поверхности и датчиком концентрации углекислого газа в помещении.

Таблица 4.9 – Уровень комфортности микроклимата в помещениях здания непроизводственного назначения

№ п/п	Тип работ	Приведенное термическое сопротивление одежды $R_{о,кло}$	Показания МЭС-200А			$U_{ком}$ (степень комфортности)
			$T_{в}, ^\circ\text{C}$	$w, \text{ м/с}$	$\varphi, \%$	
1	лабораторная работа	1	22,7	0,1	27	-0,347 (прохладно, легкий дискомфорт)
2	офисная работа	0,5	23	0,04	23	-0,342 (прохладно, легкий дискомфорт)
3	лабораторная работа	1	23,3	0,11	28	-0,186 (прохладно, но комфортно)
4	офисная работа	0,5	25,3	0,11	28	0,098 (комфортно)

4.7 Использование критерия комфортности микроклимата при регулировании отопительной нагрузки объектов

Предложенный критерий комфортности микроклимата в помещениях зданий непроизводственного назначения – уровень комфортности микроклимата может быть использован в системах управления отопительной нагрузки для обеспечения комфортного для человека теплового режима объектов.

Автоматизированные индивидуальные тепловые пункты (ИТП) позволяют регулировать количество тепловой энергии, передаваемое в систему отопления для поддержания заданной температуры воздуха в контрольных помещениях. На рисунке 4.13 приведена принципиальная схема ЦТП (ИТП) с одноступенчатой системе присоединения водоподогревателей горячего водоснабжения и зависимым присоединением системы отопления [97].

В регулятор 6 (рис. 4.13) поступают показания датчиков 10, измеряющих температуру наружного воздуха, воздуха в контрольных помещениях, а также температуру в прямом и обратном трубопроводе системы отопления.

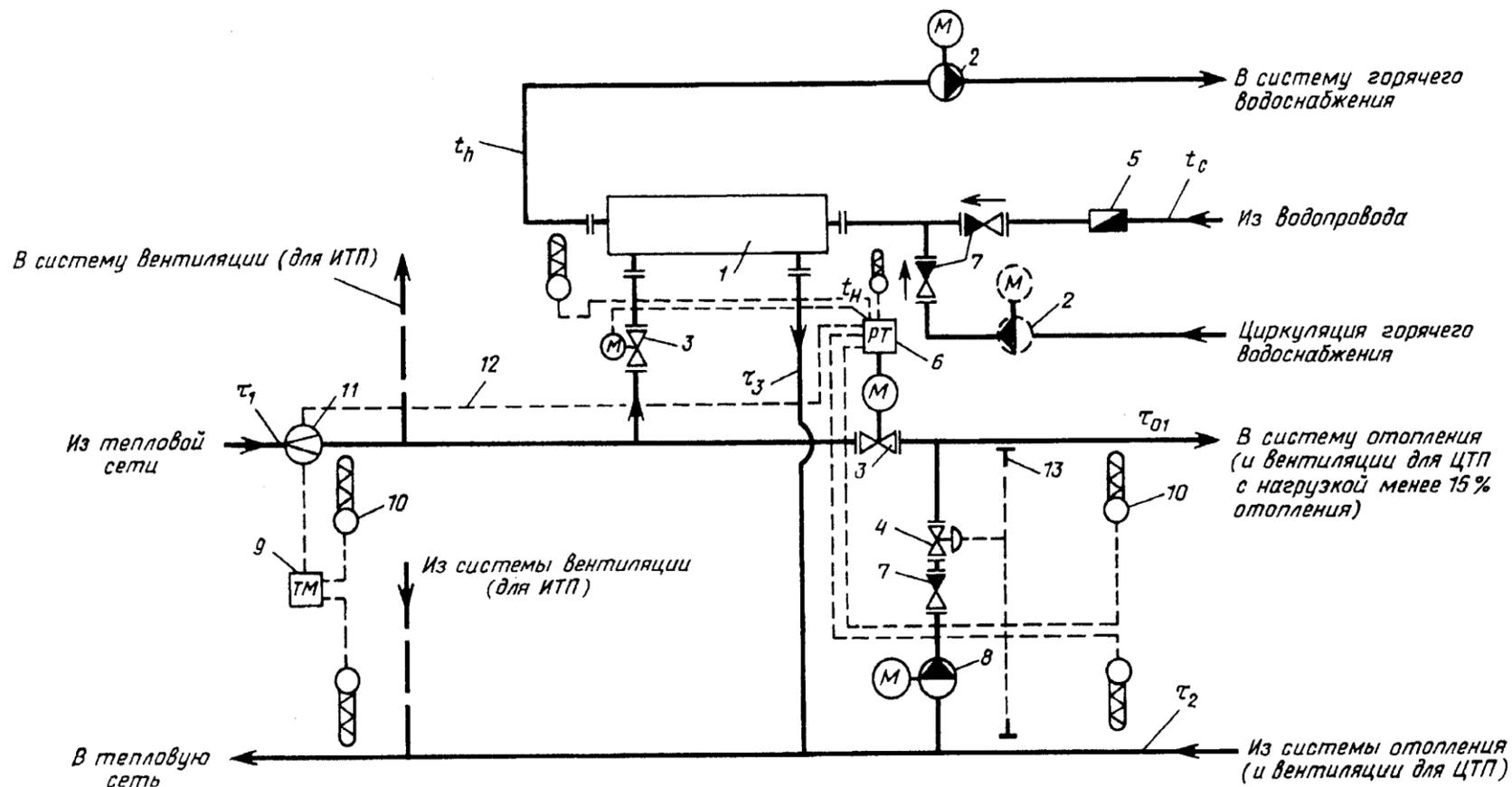


Рисунок 4.13 – Принципиальная схема ЦТП (ИТП) с одноступенчатой системой присоединения водоподогревателей горячего водоснабжения и зависимым присоединением системы отопления: 1 – водоподогреватель горячего водоснабжения; 2 – повысительно-циркуляционный насос горячего водоснабжения (пунктиром – циркуляционный насос); 3 – регулирующий клапан с электроприводом; 4 – регулятор перепада давлений; 5 – расходомер холодной воды; 6 – регулятор подачи теплоты на отопление, горячее водоснабжение и ограничения максимального расхода сетевой воды на ввод; 7 – обратный клапан; 8 – корректирующий подмешивающий насос; 9 – теплосчетчик; 10 – датчик температуры; 11 – датчик расхода воды; 12 – сигнал ограничения максимального расхода воды из тепловой сети на ввод; 13 – датчик давления воды в трубопроводе

При изменении температуры наружного воздуха регулятор 6 воздействует на клапан с электроприводом 3, увеличивая или уменьшая расход теплоносителя в целях поддержания в контрольных помещениях заданной температуры воздуха. Температура воздуха в контрольных помещениях может быть задана постоянной или изменяться в зависимости от времени или режима работы объекта для зданий общественных и административных (при использовании системы дежурного отопления)

Предложено использовать разработанную программу «Определение уровня и степени комфортности помещений жилых, общественных и административных зданий» (УСК01)» для определения комфортной для человека температуры в контрольном помещении в зависимости от изменяющейся подвижности и относительной влажности воздуха. При этом необходимо внести соответствующие изменения в программу управления регулятором отопительной нагрузки 6 (рис. 4.13), а также дополнить систему сбора информации в контрольном помещении датчиком относительной влажности и подвижности воздуха.

Регулирование отопительной нагрузки необходимо выполнять, поддерживая заданный уровень комфортности по следующему алгоритму:– измерение температуры воздуха, относительной влажности и подвижности воздуха в контрольном помещении с передачей информации в систему управления отопительной нагрузкой;

– вычисление при помощи микропроцессора уровня комфортности микроклимата и сравнение его с заданным значением. При этом поправки на вредности, характерные для помещений здания могут быть учтены установкой дополнительных датчиков, измеряющих температуру поверхностей или содержание в воздухе примесей;

– регулирование отопительной нагрузки путем воздействия системы управления на регулирующий клапан 3 (рис. 4.13) в зависимости от рассчитанного уровня комфортности микроклимата (увеличение расхода теплоносителя при недостатке теплоты, и его снижение – при избытке). Таким образом, с одной стороны, может быть решена задача повышения эффективности использования энергии, за счет устранения дополнительных источников отопления или охлаждения при некомфортно низкой или высокой температуре воздуха в помещении, а с другой стороны, обеспе-

чения комфортных условий пребывания человека в помещении, что положительно сказывается на его самочувствии, работоспособности и здоровье.

4.8 Выводы по главе 4

1. Предложенный метод оценки эффективности энергосберегающих мероприятий, учитывающий как экономические показатели реализации проекта, так и влияние проекта на комфортность микроклимата, позволяет:

а) минимизировать или полностью исключить необходимость внедрения сопутствующих мероприятий;

б) повысить точность расчета технических и экономических показателей энергосберегающего мероприятия за счет использования параметров внутренней среды, максимально приближенных к реальным условиям эксплуатации объекта;

в) повысить экологичность и комфортность внутренней среды помещений жилых, общественных и административных зданий при соблюдении требований сокращения потребления ТЭР.

2. Приведены примеры оценки эффективности типовых энергосберегающих мероприятий для помещений общественного здания с учетом обеспечения комфортного микроклимата.

3. Предложена компьютерная программа для расчета уровня комфортности микроклимата в помещении здания непромышленного назначения, позволяющая:

а) рассчитать уровень комфортности микроклимата и определить степень комфортности микроклимата;

б) получить номограммы для определения сочетания параметров микроклимата, обеспечивающего заданный уровень комфортности.

4. Предложена концепция мобильного измерительно-вычислительного комплекса для оценки уровня комфортности микроклимата в помещениях жилых, общественных и административных зданий.

5. Предложен способ регулирования отопительной нагрузки объектов непромышленного назначения, учитывающий комфортность микроклимата помещений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнен обзор научно-технической литературы по теме исследования, в результате которого доказана необходимость совместного решения задач энергосбережения и создания комфортного для человека микроклимата в производственных зданиях, выявлены достоинства и недостатки используемых в настоящее время методов оценки эффективности энергосберегающих мероприятий и методов определения комфортности микроклимата.

2. Предложен новый комплексный критерий комфортности микроклимата (уровень комфортности микроклимата), который учитывает физиологические особенности человека, параметры внутренней среды помещения и качество воздуха, а также дополнительные вредности, характерные для зданий производственного назначения. Метод расчета уровня комфортности микроклимата, реализован в виде компьютерной программы (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016615407 от 23 мая 2016 г) и комплекта номограмм. Доказана возможность использования метода в инженерной практике.

3. Получены новые экспериментальные данные о влиянии энергосберегающих мероприятий на воздухообмен и параметры внутренней среды помещений.

4. Разработана установка для определения воздухообмена зданий с естественной вентиляцией. Результаты определения фактического воздухообмена были использованы при задании граничных условий разработанной математической модели, а также имеют практическую ценность при внедрении типовых герметизирующих зданий энергосберегающих мероприятий.

5. Разработана математическая модель процессов теплообмена в помещении с естественной вентиляцией с учетом многокомпонентного состава воздушной среды и фактического воздухообмена помещения. Адекватность математической модели доказана путем сравнения результатов расчета основных параметров воздушной среды с экспериментальными данными. Относительная погрешность моделирования составила не более 9,5%. Доказана возможность ис-

пользования предложенной математической модели для прогнозирования параметров микроклимата здания после реализации потенциала энергосбережения.

6. Разработан новый метод оценки эффективности энергосберегающих мероприятий для жилых, общественных и административных зданий при обеспечении заданного уровня комфортности микроклимата. Метод позволяет реализовать потенциал энергосбережения объекта при создании комфортной для человека внутренней среды, а также уточнить технические и экономические характеристики энергосберегающего проекта. Приведены примеры повышения эффективности типовых герметизирующих здание энергосберегающих мероприятий.

7. Получена зависимость уровня комфортности микроклимата помещений от внедрения типовых энергосберегающих мероприятий, направленных на сокращение потребления тепловой энергии за счет утепления и герметизации зданий.

8. Предложена концепция измерительно-вычислительного комплекса для контроля параметров внутренней среды помещений в целях определения уровня комфортности микроклимата и анализа эффективности энергосбережения.

9. Разработаны рекомендации по совершенствованию способа регулирования тепловой нагрузки индивидуальных тепловых пунктов для обеспечения комфортной внутренней среды при минимальных затратах тепловой энергии.

10. Результаты диссертационной работы переданы АО «ИвГТЭ» (г. Иваново), НКО Фонд «Энергоэффективность» (г. Ярославль), Центру комплексной энергоэффективности ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет» (г. Москва) и внедрены в учебный процесс ИГЭУ.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АЭС – атомная электрическая станция;

ВИЭ – возобновляемые источники энергии;

ВВП – валовой внутренний продукт;

ГВС – горячее водоснабжение;

ГСМ – горюче-смазочные материалы;

ГУ – граничные условия;

ГЭС – гидроэлектростанция;

ЕС – Европейский Союз;

ИГЭУ – Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина;

ИЭА – интегрированный энергетический анализ;

ПВК – программно-вычислительный комплекс;

ПГ – природный газ;

РТО – радиационный теплообмен;

ТЭ – тепловая энергия;

ТЭР – топливно-энергетические ресурсы;

ТЭС – тепловая электрическая станция;

ФЗ – Федеральный закон;

ФЭП – функционально-экологическое проектирование;

ЭЭ – электрическая энергия;

A – коэффициент поглощения;

C – локальная массовая концентрация компонента смеси, кг/кг;

D – коэффициент диффузии, м²/с;

E – удельная энергия, Дж/кг;

f – площадь, м²;

G – мощность источника турбулентной кинетической энергии, кг/(м·с³);

g – ускорение свободного падения, м/с²;

h – удельная массовая энтальпия, Дж/кг;

$h_{\text{уд}}$ – количество углекислого газа, выдыхаемого одним человеком в час, л/ч;

I – интенсивность излучения, Вт/(м²·ср);

J – плотность потока компонента смеси, кг/(с·м²);

K_{TK} – коэффициент комфортности теплового состояния человека;

k – кинетическая энергия турбулентности, м²/с³;

L – воздухообмен помещения, м³/ч;

N – количество человек, находящихся в помещении;

n – показатель преломления среды (глава 3); кратность воздухообмена помещения, ч⁻¹ (глава 2);

p – давление, Па;

Q – тепловой поток, Вт;

q – поверхностная плотность теплового потока; Вт/м²;

q_r – источниковый член в уравнении сохранения энергии, Вт/м³;

R_t – термическое сопротивление теплопередаче, (м²·°C)/Вт;

\vec{r} – радиус-вектор, м;

S_h – мощность источника теплоты в расчетной области, Вт/м³;

S_i – мощность источника i -ого компонента смеси, кг/(с·м³);

\vec{s} – вектор направления радиационного излучения, м;

\vec{s}' – вектор направления рассеивания радиационного излучения, м;

T – температура, °C или К;

$U_{\text{ком}}$ – уровень комфортности микроклимата;

V – объем, м³;

w – скорость, м/с;

w^t – пульсация скорости потока, м/с;

α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°C);

γ – объемная концентрация компонента смеси, кг/м³;

δ – символ Кронекера;

- ε – скорость диссипация кинетической энергии турбулентности, $\text{м}^2/\text{с}^2$ (глава 3);
 поправочный коэффициент (глава 2);
 ε_w – интегральная степень черноты твердой поверхности;
 η – коэффициент полезного действия механической работы;
 λ – коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$;
 μ – динамический коэффициент вязкости, $\text{Па}\cdot\text{с}$;
 ν – кинематический коэффициент вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$;
 ρ – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$;
 σ_0 – постоянная Стефана-Больцмана, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К}^4)$;
 σ_s – коэффициент рассеивания;
 τ – время, с;
 φ – относительная влажность воздуха, %;
 φ_{c-w} – угловой коэффициент излучения с поверхности тела человека в окружающую среду;
 Ω – телесный угол, ср.

Индексы

- v – воздух;
 CO_2 – углекислый газ;
 eff – эффективное значение;
 H_2O – водяной пар;
 i – характеристика i -ого компонента смеси;
 m – газовая смесь;
 N_2 – азот;
 O_2 – кислород;
 t – турбулентное значение;
 w – твердая поверхность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авраменко, М.И. О k - ε модели турбулентности / М.И. Авраменко – Снежинск, Издательство РФЯЦ – ВНИИТФ, 2005. – 76 с.
2. Адрианов, В.Н. Основы радиационного и сложного теплообмена / В.Н. Адрианов. – М.: Энергия, 1972. – 464 с.
3. Аксенов, А.А. Программный комплекс Flow Vision для решения задач аэродинамики и тепломассопереноса методами численного моделирования / А.А. Аксенов, А.В. Гудзовский // Сб. докладов III-го съезда АВОК. – Спб.: 1993.
4. Арутюнов, В.А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей / В.А. Арутюнов, В.В. Бухмиров, С.А. Крупенников. – М.: Металлургия, 1990. – 239 с.
5. Балабанов, Е.И. Кожа человека. Механические свойства. Теплопередача. Аналитический обзор / Е.И. Балабанов. – М.: 2001.
6. Белов, И.А. Моделирование турбулентных течений / И.А. Белов, С.А. Исаев. – СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2001. – 108 с.
7. Берковский, Б.М. Разностные методы исследования задач теплообмена / Б.М. Берковский, Е.Ф. Ноготов. – Минск: «Наука и техника», 1976. – 144 с.
8. Блох, А.Г. Теплообмен излучением: справочник / А.Г. Блох, Ю.А. Журавлев, Л.Н. Рыжков. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 432 с.
9. Богословский, В.Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха): учебник для вузов / В.Н. Богословский. – М.: Высшая школа, 1982. – 415 с.
10. Богословский, В.Н. Тепловой режим здания: учебник для вузов / В.Н. Богословский. – М.: Стройиздат, 1979. – 248 с.
11. Бутцев, Б.И. Приточные устройства – достойное дополнение к герметичным окнам // СК. – 2000. – №3. – С. 34 – 36.
12. Бухмиров, В.В. Зональные методы расчета радиационного и сложного теплообмена / В.В. Бухмиров, Ю.С. Солнышкова. – Иваново: ИГЭУ, 2012. – 96 с.

13. Бухмиров, В.В. Классификация методик проведения энергетического обследования / В.В. Бухмиров, В.В. Банников // Вестник энергоэффективности, 2012. – № 1. – С. 4 – 10.
14. Бухмиров, В.В. Методические рекомендации по оценке эффективности энергосберегающих мероприятий / В.В. Бухмиров, Н.Н. Нурахов, П.Г. Косарев и др. – Томск: ИД ТГУ, 2014. – 96 с.
15. Бухмиров, В.В. Оценка микроклимата в помещениях жилых, общественных и административных зданий / В.В. Бухмиров, М.В. Пророкова // Вестник ИГЭУ, 2015, № 4. – С. 5 – 10.
16. Бухмиров, В.В. Разработка и использование математических моделей для решения актуальных теплотехнических задач металлургического производств: автореф. дис. ... д-ра. тех. наук: 05.16.02 / Бухмиров Вячеслав Викторович. – М., 1998. – 48 с.
17. Бухмиров, В.В. Результаты энергоаудита зданий и сооружений бюджетных учреждений / В.В. Бухмиров, О.Н. Махов, М.В. Пророкова // Материалы межд. НТК «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XVII Бенардосовские чтения), 2013, т. 2. – С. 222 – 225.
18. Бухмиров, В.В. Справочные материалы для решения задач по курсу «Тепломассообмен» / В.В. Бухмиров, Д.В. Ракутина, Ю.С. Солнышкова. – Иваново, ИГЭУ, 2009. – 104 с.
19. Воронин, А.А. Численное моделирование турбулентного потока воздуха с использованием метода отсоединенных вихрей / А.А. Воронин, Г.Н. Лукьянов, Е.В. Фролов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2014.– № 1 (89).– С. 187 – 192.
20. Гальперова, Е.В. Энергопотребление населения и сферы услуг России на фоне мировых тенденций / Е. В. Гальперова // Проблемы прогнозирования. – 2011. – № 3. – С. 93-99.
21. Гаранин, А.В. Разработка систем динамического микроклимата и создание на их основе энергосберегающих режимов работы оборудования: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.14.04 / Гаранин Алексей Валентинович. – Иваново, 2010. – 20 с.

22. Гарбарук, А.В. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений / А.В. Гарбарук, М.Х. Стрелец, М.Л. Шур. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 88 с.
23. Гарькавый К.А. Анализ эффективности микроклимата помещений / К.А. Гарькавый, С.Н. Бегдай // Энергосбережение и водоподготовка. – 2006. – № 6. – С. 76 – 77.
24. Генцлер, И.В. Энергосбережение в многоквартирном доме: информационно-методическое пособие / И.В. Генцлер, Е.Ф. Петрова, С.Б. Сиваев, Т.Б. Лыкова. – Тверь: Научная книга, 2009. – 130 с.
25. ГК «ПЛМ Урал»: официальный сайт [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://cae-expert.ru> {дата обращения: 04.05.2016 г.}.
26. Госмен, А.Д. Численные методы исследования течений вязкой жидкости / А.Д. Госмен, В.М. Пан, Д.Б. Сполдинг и др. – М.: «Мир», 1972. – 320 с.
27. ГОСТ 30494–2011 Межгосударственный стандарт. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. – М.: Стандартинформ. – 2013.– 16 с.
28. ГОСТ 31167-2009 Здания и сооружения. Методы определения воздухопроницаемости ограждающих конструкций в натуральных условиях. – М.: ФГУП Стандартинформ, 2011. – 16 с.
29. ГОСТ ЕН 13779-2007 Национальный стандарт Российской Федерации. Технические требования к системам вентиляции и кондиционирования. Вентиляция в нежилых зданиях (ЕН 13779: 2005 Ventilation for non-residential buildings – Performance requirements for ventilation and room-conditioning systems): [Утв. Приказом Федер. агентства по тех. рег. метр-ии от 27 декабря 2007 г. № 616-ст]. – М.: Стандартинформ, 2008. – 48 с.
30. ГОСТ Р 51749-2001. Энергосбережение. Энергопотребляющее оборудование общепромышленного применения. Виды. Типы. Группы. Показатели энергетической эффективности. Идентификация. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. – 32 с.

31. ГОСТ Р 51750-2001. Энергосбережение. Методика определения энергоемкости при производстве продукции и оказании услуг в технологических энергетических системах. Общие положения. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. – 32 с.
32. Гримитлин, А.М. Математическое моделирование в проектировании систем вентиляции и кондиционирования / А.М. Гримитлин, Т.Е. Дацюк, Д.М. Денисихина. – СПб.: АВОК Северо-Запад, 2013. – 192 с.
33. Данилов, Н.И. Основы энергосбережения / Н.И. Данилов, Я.М. Щелков; под. ред. Н.И. Данилова. – Екатеринбург: ГУСО «Институт энергосбережения», 2008. – 526 с.
34. Дацюк, Т.А. Качество воздуха в зданиях с естественной вентиляцией / Т.А. Дацюк // Сантехника, отопление, кондиционирование. – 2016. – № 1. – С. 78 – 81.
35. Дацюк, Т.А. Моделирование микроклимата жилых помещений / Т.А. Дацюк, В.Р. Таурит // Вестник гражданских инженеров. – 2012. – № 4 (33). – С. 196 – 199.
36. Дацюк, Т.А. Моделирование процесса вентиляции [Электронный ресурс] / Т.А. Дацюк, А.В. Сауц, Б.Н. Юрманов, В.Р. Таурит // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 5. – Режим доступа: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=6744> {дата обращения: 07.09.2016}
37. Дацюк, Т.А. Результаты моделирования микроклимата жилых помещений при различных типах отопительных приборов / Т.А. Дацюк, Ю.П. Ивлев, В.А. Пухкал // Инженерно-строительный журнал. – 2013. – № 6. – с. 12 – 21.
38. Денисихина, Д.М. Особенности численного моделирования поведения воздушных потоков в объемах концертных и театральных залов [Электронный ресурс] / Д.М. Денисихина // интернет-журнал «Науковедение». – 2014. – вып. 3. – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/81TVN314.pdf> {дата обращения: 03.08.2016 г.}.
39. Денисихина Д.М. Оценка теплового комфорта в помещениях на основе анализа результатов математического моделирования / Д.М. Денисихина // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2015. – № 3 (50). – С. 183 – 193.

40. Дячек, П.И. Моделирование микроклимата отапливаемых помещений / П.И. Дячек, А.Э. Захаревич // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2009. – № 2. – С. 34 – 47.
41. Зенкевич, О. Конечные элементы и аппроксимация / О. Зенкевич, К. Морган; пер. с англ. Б.И. Квасова. – М.: Мир, 1986. – 320 с.
42. Здоровье человека и углекислый газ [Электронный ресурс]. – ООО «ЭНОТЕК». – Режим доступа: <http://enontek.ru/CO2/zdorove-cheloveka> {дата обращения 21.06.201}.
43. Ильинский, В.М. Строительная теплофизика (ограждающие конструкции и микроклимата зданий): учеб. пособие для инж.-строит. вузов / В.М. Ильинский. – М.: Высшая школа, 1973. – 320 с.
44. Использование программного пакета FLUENT для решения задач по газодинамике [Электронный ресурс] : электрон. метод. указания к лаб. работам / Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т); сост. В. В. Бирюк, А. А. Горшкалев, Д. А. Угланов. – Самара, 2012.
45. Киселева, Е. С. Исследование процессов лучистого теплообмена в излучающих системах различной конфигурации с поглощающей средой / Е.С. Киселева, А.А. Федоров // Технические науки в России и за рубежом: материалы III Междунар. науч. конф. (г. Москва, июль 2014 г.). – М.: Буки-Веди, 2014. — С. 69 – 73.
46. Китайцева, Е.Х. Естественная вентиляция жилых зданий / Е.Х. Китайцева, Е.Г. Малявина // АВОК. – 1999. – № 3. – С. 35 – 39.
47. Князихин, Ю. Метод дискретных ординат решения уравнений переноса / Ю. Князихин, А. Маршак. – Таллин.: Валгус, 1987. – 163 с.
48. Компьютерный инжиниринг: учеб. пособие / А.И. Боровков [и др.]. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 93 с.
49. Костин, В.И. Принципы расчета эффективных энергосберегающих систем обеспечения микроклимата промышленных зданий: дис.... д-ра техн. наук: 05.23.03 / Костин Владимир Иванович. – Новосибирск, 2001. – 324 с.

50. Кочетков, О.С. Расчет оптимальных параметров микроклимата рабочей зоны / О.С. Кочетков, С.И. Гетия, Л.Н. Скребкова // Вестник МГУПИ. – 2013. – № 45. – С. 84 – 92.
51. Кочетов, О.С. Способ многокритериальной оценки комфортности рабочей зоны производственных помещений / О.С. Кочетов, М.О. Стареева. – М.: №2472134.
52. Кричевцов, Е.А. Теплоэнергетика сталеплавильного производства / Е.А. Кричевцов, Я.М. Щелоков. – М.: Metallurgia, 1986. – 104 с.
53. Круглик, В.М. Основы энергосбережения / В.М. Круглик, Н.Г. Сычев. – Мн.: ИПД, 2010. – 138 с.
54. Кувшинов, Ю.Я. Основы обеспечения микроклимата зданий / Ю.Я. Кувшинов, О.Д. Самарин. – М.: Издательство АСВ, 2012. – 200 с.
55. Кувшинов, Ю.Я. Теоретические основы создания микроклимата в помещении / Ю.Я. Кувшинов. – М.: Изд. АСВ, 2007. – 183 с.
56. Кузьмин, С.И. Эффективность теплосберегающих мероприятий для крупнопанельного жилого дома / С.И. Кузьмин // Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета. – Ангарск: Ангарский государственный технический университет, 2013. – С. 166 – 171.
57. Кучма, В.Р. Гигиена детей подростков: учебник для вузов / В.Р. Кучма. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2007. – 480 с.
58. Лаптев, А.П. Гигиена / А.П. Лаптев С.А. Полиевский. – М.: Физкультура и спорт, 1990 г. – 368 с.
59. Лепеш, Г.В. Имитационное моделирование дифференцированного обогрева вентилируемого помещения комплексом современных отопительных приборов / Г.В. Лепеш, Г.А. Спроге, Ю.В. Отодворец // Технико-технологические проблемы сервиса. – 2015. – № 1 (31). – С. 31 – 37.
60. Литвинцев, К.Ю. Использование метода конечных объемов для решения уравнения переноса теплового излучения в трехмерных задачах / К.Ю. Литвинцев // Вычислительные технологии. – 2014. – Т. 19. – № 5. – Новосибирск: Ин-т выч. техн. Сиб. отд. РАН. – С. 37-50.

61. Лисиенко, В.Г. Интегрированный (обобщенный) энергетический анализ - теоретическая основа энергоэффективности и энергосбережения / В. Г. Лисиенко // Информационный научно-технический журнал. Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века, 2004. – № 9 (68). – С. 14 – 16.
62. Лисиенко, В.Г. Хрестоматия энергосбережения: справочное издание / Лисиенко В.Г. и др.; под ред. В.Г. Лисиенко. – М.: Теплотехник, 2005. – 768 с.
63. Литвинцев, К.Ю. Совершенствование методов моделирования лучистого теплообмена и оптических свойств среды применительно к высокотехнологичным процессам и пожарам: автореф. дис. канд. тех. наук: 01.04.14 / Литвинцев Кирилл Юрьевич. – Новосибирск, 2012. – 24 с.
64. Лифчак, И.Ф. Вентиляция многоэтажных жилых зданий / И.Ф. Лифчак, А.Л. Наумов. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2005. – 134 с.
65. Лыков, А.В. Конвекция и тепловые волны / А.В. Лыков, Б.М. Берковский. – М.: Энергия, 1974. – 336 с.
66. Лыков, А.В. Теплообмен: справочник / А.В. Лыков. – М.: Энергия, 1978. – 480 с.
67. Максимович, В. А. Критерий комфортности микроклиматических условий / В.А. Максимович // Техника безопасности, охрана труда и горноспасательное дело. - 1977. -№6. – С. 22-23.
68. Мальцев, А.В. Энергосберегающие ограждающие конструкции с использованием местных материалов при варьируемых параметрах теплопередачи: автореф. дис. канд. тех. наук: 05.23.01 / Мальцев Алексей Викторович. – Пенза, 2014. – 20 с.
69. Мачкаши, А. Лучистое отопление / А. Мачкаши, Л. Банхиди; пер. с венгерского В.М. Беяева; под. ред. В.Н. Богословского и Л.М. Махова. – М.: Стройиздат, 1985. – 464 с.
70. Мельников, В.М. Методы экономической оценки инвестиций в энергосберегающие мероприятия / В.М. Мельников, В.М. Мокроусов // Апробация. – 2013. – № 2 (5). – С. 9 – 10.

71. Метеометр МЭС – 200А. Руководство по эксплуатации. ЯВ-ША.416311.003 РЭ.
72. Методические рекомендации по расчету эффектов от реализации мероприятий по энергосбережению и повышению энергетической эффективности [Электронный ресурс] / Аналитический центр при Правительстве Российской Федерации. – М: Минстрой России, 2016. – 56 с. . – Режим доступа: <http://www.minstroyrf.ru/docs/11291/> {дата обращения: 21.02.2017 г.}.
73. Наумов, А.Л. CO₂: Критерий эффективности систем вентиляции / А.Л. Наумов, Д.В. Капко // АВОК. – 2015. – № 1. – С. 12 – 21.
74. Невский, А. С. Теплообмен излучением в металлургических печах и топках котлов / А.С. Невский. – Свердловск, 1958. – 368 с.
75. Николаев, А. ТЭБ Москвы: энергетическая и стоимостная структуры [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.energyland.info/analitic-show-81476> {дата обращения: 01.02.2016 г.}.
76. Олесен, Б.В. Показатели микроклимата помещений для проектирования зданий и расчета их энергетической эффективности – EN 15251 / Б.В. Олесен // АВОК. – 2008, – № 6. – С. 62 – 90.
77. ООО ТЕСИС: официальный сайт [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://flowvision.ru> {дата обращения: 03.06.2015 г.}.
78. Патанкар, С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / С. Патанкар; пер. с англ. В.Д. Виленского. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
79. Пекер, Я.Д. Математическое моделирование микроклимата зданий / Я.Д. Пекер; под. ред. Д.Н. Яблонского. – М.: Центр науч.-техн. инф. по гражд. стр-ву и арх-ре, 1970. – 106 с.
80. Пивоваров, Н. Энергетический кризис 1973 – 1974 гг. в контексте противостояния СССР, США и стран Третьего мира [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://statehistory.ru/5125/Energeticheskiy-krizis-1973---1974-gg--v-kontekste-protivostoyaniya-SSSR---SSHA-i-stran-Tretego-mira/> {дата обращения: 015.03.2015 г.}.

81. Полежаев, В.И. Математическое моделирование конвективного теплообмена на основе уравнений Навье–Стокса / В.И. Полежаев, А.В. Бунэ, Н.А. Вerezуб и др. – М.: Наука, 1987. – 272 с.
82. Портал государственных программ Российской Федерации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://programs.gov.ru/> {дата обращения: 03.09.2016 г.}.
83. Постановление Правительства Российской Федерации от 7 марта 2017 г. № 275 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://government.ru/docs/> {дата обращения: 25.03.2017 г.}.
84. Прогноз развития энергетики мира и России до 2040 г. – М.: Аналитический центр при Правительстве Российской Федерации. – 2014.
85. Пыжов, В.К. Энергетические системы обеспечения жизни и деятельности человека / В.К. Пыжов. – Иваново: ИГЭУ, 2008. – 496 с.
86. Разработка научно-обоснованных предложений по мерам государственной поддержки и стимулирования в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности, в том числе анализ деятельности существующих и разработка предложений по созданию отраслевых фондов поддержки внедрения наилучших доступных технологий в отраслях ТЭК с учетом межотраслевого характера деятельности данных фондов: отчет о НИР / В.В. Бухмиров и др. – Иваново: ИГЭУ, 2015. – 474 с.
87. Рациональное использование топливно-энергетических ресурсов (Сер. «Экономия топлива и энергии») / Я.М. Щелоков [и др.]. – М.: Metallургия, 1990. – 149 с.
88. Рубцов, Н.А. Теплообмен излучением в сплошных средах / Н.А. Рубцов. – Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1984. – 278 с.
89. Самарин, О.Д. Оценка эффективности энергосберегающих мероприятий в условиях рыночной экономики / О.Д. Самарин, С.Ю. Барвинский, И.Р. Садикова // Новости теплоснабжения. – 2005. – № 6.
90. СанПиН 2.1.2.2645-10 Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. Санитарно-эпидемиологические требования к условиям проживания в

жилых зданиях и помещениях: [утв. пост. Глав. гос. врача РФ от 02 августа 2010 г. № 99]. – М.: Роспотребнадзор. – 2010. – 28 с.

91. Сегерлинд, Л. Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд; пер. с англ. А.А. Шестакова. – М.: Мир, 1979. – 195 с.

92. Семенов, В.Н. Энергосбережение и повышение энергоэффективности для объектов социальной сферы / В.Н. Семенов, Д.Н. Китаев, Т.В. Щукина, Д.Ю. Королев // Энергосбережение. – 2010. – № 6. – С. 38 – 43.

93. Снегирев, А.Ю., Высокпроизводительные вычисления в технической физике. Численное моделирование турбулентных течений: учеб. пособие / А.Ю. Снегирев. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 143 с.

94. Соболев, И.М. Метод Монте-Карло / И.М. Соболев. – М.: Наука, 1988. – 64 с.

95. Соколов, Е.Я. Теплофикация и тепловые сети / Е.Я. Соколов. – М.: МЭИ, 2001. – 472 с.

96. СП 23-101-2004 Проектирование тепловой защиты зданий. – М.: ФГУП ЦПП, 2004. – 140 с.

97. СП 41-101-96 «Проектирование тепловых пунктов». – М, 1996.

98. СП 50.13330.2012 Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003. – М.: ФАУ ФЦС, 2012. – 96 с.

99. СП 60.13330.2012 Свод правил. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Актуализированная редакция СНиП 41-01-2003: [утв. приказом Минрегион России от 30.06.2012 г. № 279]. – М.: ФЦС, 2012. – 80 с.

100. СП 118.13330.2012 Общественные здания и сооружения. – М.: ФАУ ФЦС, 2014 – 76 с.

101. СП 131.13330.2012 Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99* (с Изменением № 2). – М.: ФАУ ФЦС, 2012. – 124 с.

102. СТО НОСТРОЙ 2.35.4-2011 Здания жилые и общественные. Рейтинговая система оценки устойчивости среды обитания. – М.: НП «АВОК», 2011. – 60 с.

103. Стандарт АВОК-2.1-2008 "Здания жилые и общественные. Нормы воздухообмена". – М.: АВОК, 2008. – 16 с.

104. Стратегия развития ЖКХ до 2020 года: инфографика [Электронный ресурс]. – М.: Минстрой России. – 2016. – Режим доступа: <http://www.minstroyrf.ru/press>

105. Стрельцов, М.Х. Метод моделирования отсоединенных вихрей для расчета отрывных турбулентных течений: предпосылки, основная идея и примеры применения / М.Х. Стрельцов, А.К. Травин, М.Л. Шур, Ф.Р. Спаларт // Научно-технические ведомости. – 2004. – № 2.

106. Субботина, Е. Исследование: как воздух в офисе влияет на работу мозга [Электронный ресурс] / Е. Субботина // Российская газета. 30.10.2015. – Режим доступа: <http://rg.ru/2015/10/30/vozduh-site-anons.html> {дата обращения: 04.04.2015 г.}.

107. Суринов, Ю.М. Методы определения и численного расчета локальных характеристик поля излучения / Ю.М. Суринов // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт – 1956. – № 5.

108. Табунщиков, Ю.А. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий / Ю.А. Табунщиков, М.М. Бродач. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2002. – 194 с.

109. Табунщиков, Ю.А. Методы и результаты оценки эффективности энергосберегающих решений / Ю.А. Табунщиков, Н.В. Шилкин, Ю.В. Миллер // АВОК. – 2013. – № 7. – С. 38 – 49.

110. Табунщиков Ю.А. Микроклимат и энергосбережение: пора понять приоритеты / Ю.А. Табунщиков // АВОК. – 2008. – № 5. – С. 4– 11.

111. Табунщиков, Ю.А. Нормативное обеспечение энергосбережения и качества среды обитания / Ю.А. Табунщиков // Энергосбережение. – 2011. – № 8. – С. 22 – 25.

112. Табунщиков, Ю.А. Расчет теплотерь помещения при раздельном учете конвективного и лучистого теплообмена / Ю.А. Табунщиков // АВОК. – 2007. – № 8. – С. 64 – 69.

113. Теплообмен излучением: пер. с англ. / Р. Зигель, Дж. Хауэлл; под ред. Б. А. Хрусталева. – М.: Мир, 1975. – 934 с.

114. Турбулентность / Под ред. У. Фроста, Т. Моулдена. - М.: Мир, 1980. – 535 с.
115. Тургиев, А.К. Функционально-экологическое проектирование энерго-сберегающих систем / А.К. Тургиев, Ю.А. Судник, В.В. Тебнев // сб. докладов Международной научно-технической конференции «Энергосбережение в сельском хозяйстве» (5-7 октября 1998 г.). – М: Изд-во ВИЭСХ, 1998.
116. Уляшева, В.М. Численное моделирование воздушных потоков в кондиционируемом помещении / В.М. Уляшева, М.А. Канев // Известия вузов. Строительство, № 9-10, 2014. – С. 65 – 70.
117. Усмонов, Ш.З. Моделирование энергетических затрат на отопление и охлаждение 5-этажного жилого дома и оценка температурных условий по индексам теплового комфорта PMV и PPD / Ш.З. Усмонов. – Душанбе: Вестник МГСУ. – 2013. – № 10. – С. 216 – 229.
118. Фангер, П.О. Качество внутреннего воздуха в XXI веке: влияние на комфорт, производительность и здоровье людей / П.О. Фангер // АВОК. – 2003. – № 4. – С. 12 – 21.
119. Федеральный закон № 261 от 23 ноября 2009 г.: [принят Гос. Думой 11 ноября 2009 г.: по состоянию на 26 января 2016 г.] // Российская газета. – 2009. – 27 ноября (№ 226)
120. Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений. Официальный сайт [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.fundmetrology.ru/10_tipy_si/7list.aspx {дата обращения: 24.02.2016 г.}.
121. Фонд развития промышленности. Официальный сайт [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://frprf.ru/> {дата обращения: 24.11.2015 г.}.
122. Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере. Официальный сайт [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.fasie.ru/fund/> {дата обращения: 24.11.2015 г.}.
123. Химический состав воздуха и его гигиеническое значение [Электронный ресурс]. Medical-Enc.ru. Медицинский справочник (Гигиена). – Режим досту-

па: <http://www.medical-enc.ru/gigiena/himicheskii-sostav-vozdruha.shtml> {дата обращения 22.08.2016.}.

124. Центр разработки и коммерциализации новых технологий (СКОЛКОВО). Официальный сайт [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://sk.ru/foundation/about/> {дата обращения: 24.11.2015 г.}.

125. Черный, С.Г. Численное моделирование пространственных турбулентных течений несжимаемой жидкости на основе $k-\varepsilon$ моделей / С.Г. Черный, П.А. Шашкин, Ю.А. Грязин // Вычислительные технологии. – 1999. – Т.4. – № 2. – С. 74 – 94.

126. Четверушкин, Б.Н. Математическое моделирование задач динамики излучающего газа / Б.Н. Четверушкин. – М.: Наука, 1988. – 304 с.

127. Чоджой, М.Х. Энергосбережение в промышленности / М. Х. Чоджой; пер. с англ. – М.: Metallurgia, 1982 – 272 с.

128. Шилкин, Н.В. Как экономить энергию жителям многоквартирных домов / Н.В. Шилкин // Энергосбережение. – 2012. – № 4. – М.: ООО ИИП «АВОК-ПРЕСС». – С. 30–39.

129. Шонина, Н.А. Тепловой комфорт при применении панельно-лучистого отопления / Н.А. Шонина // Промышленный электрообогрев и электроотопление. – 2014. – № 2. – Мытищи: Специальные системы и технологии. – С. 60-61.

130. Шилькрот, Е.О. Сколько воздуха нужно человеку для комфорта? / Е.О. Шилькрот, Ю.Д. Губернский // Журнал «АВОК». – 2008. – № 4. – С. 4 – 17.

131. Щелоков, Я. М. Экономии энергии – научную основу / С.Е. Розин, Я.М. Щелоков, В.Г. Лисиенко // журнал «Эко», 1984, № 3. – Новосибирск – С. 91.

132. Энергетическая стратегия России на период до 2030 г.: [утв. расп. Правительства РФ от 13 ноября 2009 г. № 1715-р]. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.energystrategy.ru/> {дата обращения: 24.10.2016 г.}.

133. Энергосбережение в ЖКХ: учебно-практическое пособие / Под. ред. Л. В. Примака, Л.Н. Чернышова. – М.: Академический проект: Альма Матер, 2011. – 622 с.

134. Энергоэффективность в России: скрытый резерв [Электронный ресурс] // Отчет, подготовленный экспертами всемирного банка, Международной финансовой корпорации и Центра по эффективному использованию энергии. –

2008. – 162 с. – Режим доступа: http://www.cenef.ru/file/FINAL_EE_report_rus.pdf. {дата обращения: 11.11.2015 г.}.

135. Юдаев, Б.Н. Теплообмен при взаимодействии струй с преградами / Б.Н. Юдаев, М.С. Михайлов, В.К. Савин. – М.: Машиностроение, 1977. – 248 с.

136. Юн, А.А. Расчет и моделирование турбулентных течений с теплообменом, смешением, химическими реакциями и двухфазных течений в программном комплексе FASTEST-3D: учебное пособие / А.А. Юн, Б.А. Крылов. – М.: Изд-во МАИ, 2007. – 116 с.

137. Яковлев, П.В. Математическое моделирование процессов формирования микроклимата в помещениях / П.В. Яковлев, Е.П. Яковлева // Вестник Астраханского государственного технического университета. – 2012. – № 2. – С. 77 – 81.

138. ANSYS Fluent User's Guide. Release 15.0. – ANSYS, Inc. November 2013. – 2692 p.

139. ASHRAE 62.1-2007 «Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality». – USA, GA, Atlanta, 2007. – 48 p.

140. Bedford, Th. Basic Principles of Ventilation and Heating / Th. Bedford. – London: H.K. Lewis, 1948.

141. BS EN 15251–2007: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics. – European Committee for Standardization, 2007. – 52 p.

142. Chai, J.C. Finite-volume method for radiation heat transfer / J.C. Chai, S.V. Patankar // Advances in Numer. Heat Transfer. Taylor and Francis Group, 2000. – Vol. 2 P. 109-138.

143. COMSOL Inc: официальный сайт [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.comsol.ru>. {дата обращения: 24.04.2016 г.}.

144. Computational Dynamics-Analysis & Design Application Company Ltd (CD-adapco): официальный сайт. – Режим доступа: <https://www.cd-adapco.com>. {дата обращения: 24.04.2016 г.}.

145. FLOW-3D Documentation. Release 10.1.0: учебное пособие. — Flow Science, 2012. – 811 с.

146. Gagge, A.P. The influence of clothing on physiological reactions of the human body to varying environmental temperatures / A.P. Gagge, C.E.A. Winslow, L.P. Harrington // *Amer. J. Physiol.* – 1968. – 124. – P. 30-50.
147. Griffiths, I.D. Subjective response to overhead thermal radiation / I.D. Griffiths, D.A. McIntyre // *Human Factor.* – 1974. – 16y3y. – P. 415-422.
148. ISO 7730:2005 Ergonomics of the thermal environment. Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria – Geneva, 2005. – 52 p.
149. Kollmar, A. Die Strahlungaheizung / A. Rollmar, W. Liese – Munchen: R. Oldenburg, 1957.
150. Launder, B.E Lectures in Mathematical Models of Turbulence / B. E. Launder, D. B. Spalding. – England, London: Academic Press, 1972.
151. Litvincev, K.Yu. Comparison of the finite-volume and discrete-ordinate methods and diffusion approximation for the radiative heat transfer equation // *Heat Transfer Res.* – 2008. – Vol. 68. – P. 653-655.
152. Lockwood, F.C. New radiation solution method for incorporation in general combustion prediction procedures / F.C. Lockwood, N.G. Shah // *Proc. of Eighteenth Symp. (Intern.) on Combustion.* Pittsburg, 1981. – P. 1405-1414.
153. Mandell, P.L. Energy Information Administration: official energy statistics from the U.S. Government / P.L. Mandell, W. Minkel // *School Library Journal.* – 2001. – Vol. 47. – № 7.
154. McNall, Jr.P.R. Thermal and comfort sensations of sedentary persons exposed to asymmetric radiant fields / Jr.P.E. McNal, R.E. Biddison // *ASHRAE Transaction.* 76. part 1., 1970.
155. Modest, M.F. Radiative Heat Transfer. Second Edition. – London, New York: Acad. Press. Elsevier Sci., 2003. – 842 p.
156. Olesen, S. Comfort limits for msn exposed to asymmetric thermal radiation / S. Olesen, P.O. Fanger, P.B. Jensen, O.J. Nielsen // *Proc. of the CIB Commission W45 (Human requirements). Symp. Thermal Comfort and Moderate Heat stress Building Research Station.* – London, 1972.

157. Scott, R. History of the IEA: The First 20 Years / R. Scott // OECD/IEA/ – 1994. – Vol. I: Origins and Structure.
158. Spalding, D.B. Simulation of Fluid Flow, Heat Transfer and Solid Deformation Simultaneously / D.B. Spalding // NAFEMS Conference. – № 4. – Brighton, 1993.
159. TESTO. Измерительное оборудование. Официальный сайт [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://spb-testo.ru/> {дата обращения: 14.04.2016 г.}.
160. Weinhold, I., Parry, J. The Three Waves of Commercial CFD // Engineering Edge. – 2015. – Vol. 2. – № 2.
161. Williams, J.C. Lecture for Franklin Institute [Электронный ресурс] / J.C. Williams; перевод В. Горбунова. – Режим доступа: <http://energoworld.ru/blog/istoriya-energetiki/> {дата обращения: 04.04.2016 г.}.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Результаты экспериментального определения параметров микроклимата в учебных и административных помещениях ИГЭУ

Таблица А.1 – Результаты измерения параметров микроклимата в аудиториях корпуса «Б»

№ аудитории	Температура, °С	Относительная влажность, %	Подвижность воздуха, м/с	ВР*
9.02.2012 г. (Т _{нв} = -20 ⁰ С)				
001Г	20,7	16	0,10	нет
001В	20,4	20	0,08	нет
006	21,6	15	0,08	нет
014	18,3	17	0,09	нет
015	18,3	26	0,07	нет
017	20,9	19	0,07	нет
017б	21,7	15	0,07	нет
019	21,8	40	0,07	нет
020	21,8	39	0,07	нет
021	23,0	10	0,08	нет
026	23	18	0,07	нет
028	24,5	16	0,06	нет
029	21,9	11	0,11	нет
13.02.2012 г. (Т _{нв} = -17 ⁰ С)				
231	23,7	12	0,07	нет
239	25,5	19	0,07	да
301	19,6	12	0,08	нет
310	22,1	21	0,07	нет
316	19,3	20	0,07	нет
318	23	14	0,09	нет
326	25,6	18	0,04	нет
328	24,9	20	0,05	нет
330	24	21	0,06	да
331	21	19	0,08	да
12.03.2012 г. (Т _{нв} = -5 ⁰ С)				
108	24,9	28	0,09	да
138	24,9	25	0,07	да
209	23	22	0,03	да
210	22,8	22	0,07	да
211	23,2	34	0,03	да
213	21,5	28	0,02	да
214	23	25	0,03	да
216	23,5	25	0,05	да
217	23,5	30	0,03	да
218	23,7	29	0,04	да
224а	24,4	28	0,06	да
224б	24,8	29	0,07	да

Продолжение таблицы А.1

230	24,6	29	0,08	да
234	24,4	22	0,04	да
236	23,8	30	0,06	да

* – возможность регулирования параметров внутренней среды

Таблица А.2 – Результаты измерения параметров микроклимата в аудиториях корпуса «А»

Номер Аудитории	Температура воздуха, °С	Относительная влажность воздуха, %	Подвижность воздуха, м/с	ВР*
Отделение кафедры физического воспитания (07.02.2012 г.; T _{нв} = -15 ⁰ С)				
Коридор 1 этаж	19,2	18	0,08	нет
с103	21,4	22	0,05	нет (спорт)**
с104а	23,5	15	0,05	нет
с104б	21,2	18	0,06	нет
с104в	23,4	13	0,08	нет
с106	20,5	13	0,08	да
с107	20,5	15	0,09	нет
с108	21,6	17	0,08	да
Мед.кабинет с222	22,1	17	0,9	да
с215	21,7	17	0,06	нет (спорт)
Зал ОФП	20,5	10	0,1	нет (спорт)
Спорт.зал (большой)	21,0	17	0,11	нет (спорт)
Спорт.зал (малый)	20,6	17	0,1	нет (спорт)
1-ый этаж (09.02.2012 г.; T _{нв} = -19 ⁰ С)				
104	21,5	19	0,06	нет
107	20,6	15	0,07	нет
122	17,9	16	0,11	нет
124а	21,8	18	0,08	нет
126	22,5	14	0,07	нет
128	22,2	14	0,06	да
2-ой этаж				
208	21,1	11	0,09	нет
209	21,7	9	0,08	нет
210	19,1	10	0,07	нет
211	18	15	0,09	нет
212	18,9	11	0,07	нет
218	20,9	17	0,06	нет
219	22,3	13	0,07	нет
3-ий этаж				
301	22,8	27	0,15	да
302	23,9	21	0,12	да
315	22,6	24	0,07	да
316	23,7	13	0,08	нет
317	22,6	15	0,07	нет
318	22,7	19	0,07	да
321	21,7	17	0,07	нет

Продолжение таблицы А.2

323	22,0	15	0,05	нет
325а	20,5	17	0,07	нет
325в	22,3	13	0,09	нет
326	23,0	15	0,04	нет
333	22,5	18	0,06	нет
337	21,6	19	0,09	нет
342	25,0	26	0,08	да
343	24,6	28	0,01	да
4-ый этаж				
402	22,8	24	0,08	нет
403	20,2	20	0,09	нет
404	20	22	0,1	нет
405	19	19	0,13	нет
406а	22,3	18	0,08	нет
407	21,8	17	0,05	нет
408	22,5	16	0,12	нет
410	21,3	17	0,1	нет
414	21	18	0,06	нет
415а	22,8	16	0,06	нет
415в	23,1	15	0,06	нет
416	23,5	16	0,12	нет
417	23,5	24	0,04	нет
424б	22	22	0,07	да
425	22	17	0,12	да
426	22,7	19	0,06	нет
427	20,8	15	0,08	нет
431	23,0	18	0,08	нет
432	22,6	18	0,05	нет
432а	25,1	28	0,08	нет
433	25,5	31	0,06	да
435	22,2	20	0,08	нет
437	21,5	21	0,07	нет
440	23,1	30	0,08	да
441	23,1	22	0,1	да
5-ый этаж				
501	21,4	20	0,03	нет
Библиотека				
Библиографический отдел	22,5	18	0,07	нет
Читальный зал	23,2	15	0,07	нет
Компьютерный зал	22,1	11	0,1	нет
Абонемент худ. ли- тературы	22,1	14	0,08	нет
Абонемента науч- ной литературы	22,3	13	0,07	нет

* – возможность регулирования параметров внутренней среды

** – помещение предназначено для занятий спортом

Таблица А.3 – Результаты измерения параметров микроклимата в комнатах общежитий*

Этаж	№ комнаты	Температура воздуха, °С		Относительная влажность воздуха, %	
		Фактическая	Нормативная*	Фактическая	Нормативная*
Общежитие 1 (28.02.2012 г.; $T_{\text{нв}} = -1^{\circ}\text{C}$)					
3	58	26,3	20÷22	30	30÷45
	57	22,9	20÷22	45	30÷45
	63	26,5	20÷22	22	30÷45
	48	26,8	20÷22	22	30÷45
4	79	27,2	20÷22	27	30÷45
	75	27,7	20÷22	30	30÷45
Общежитие №3 (15.02.2012 г.; $T_{\text{нв}} = -8^{\circ}\text{C}$)					
2	43	21,8	20÷22	39	30÷45
	38	22,9	20÷22	33	30÷45
	53	23,2	20÷22	29	30÷45
3	94	23,6	20÷22	40	30÷45
	95	24,5	20÷22	36	30÷45
	99	24,9	20÷22	38	30÷45
4	145	24,9	20÷22	42	30÷45
	146	26,1	20÷22	41	30÷45
	139	25,9	20÷22	40	30÷45
5	202	24,5	20÷22	41	30÷45
	190	25,1	20÷22	38	30÷45
	206	21,8	20÷22	37	30÷45
Общежитие №4 (15.02.2012 г.; $T_{\text{нв}} = -8^{\circ}\text{C}$)					
3	52	21,1	20÷22	34	30÷45
	56	21,2	20÷22	45	30÷45
	умывальная комната	22,7	24÷26	35	не нормируется
4	83б	22,5	20÷22	30	30÷45
	75	24,4	20÷22	40	30÷45
	71	22,8	20÷22	30	30÷45
5	99	24,3	20÷22	34	30÷45
	96	24,5	20÷22	44	30÷45

* – для жилых комнат общежитий принято наличие возможности дополнительного регулирования параметров микроклимата;

** – в качестве нормативных здесь приняты оптимальные параметры микроклимата для соответствующего типа помещений по ГОСТ 30494 [27]

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Справочные данные для определения уровня комфортности помещений не-
производственных зданий

Таблица Б.1 – Показатели метаболизма при некоторых видах деятельности (по данным Фангера) [69]

Вид деятельности	Метаболическая теплота (q_{MT}), Вт/м ²	КПД механической работы (η)	Относительная скорость в неподвижном воздухе (w_0), м/с
Отдых:			
сон	41	0	0
отдых лежа	47	0	0
сидение в спокойном состоянии	58	0	0
стояние в непринужденной позе	70	0	0
Работа в лаборатории:			
обследование разреза	82	0	0
обычная лабораторная работа	93	0	0 – 0,2
перемещение прибора	128	0	0 – 0,2
Работа, выполняемая людьми разных специальностей:			
обувщиком	116	0 – 0,1	0 – 0,1
продавцом в магазине	116	0 – 0,1	0 – 0,1
преподавателем	93	0	0
часовщиком	64	0	0
Домашняя работа:			
уборка	116 – 198	0 – 0,1	0,1 – 0,3
приготовление пищи	93 – 116	0	0 – 0,2
мытьё посуды стоя	93	0	0 – 0,2
стирка вручную и глажение	116 – 210	0 – 0,1	0 – 0,2
закупки	93	0	0,2 – 1
Работа в административных помещениях:			
печатание со скоростью, слово/мин.:			
30	52	0	0,05
40	58	0	0,05
работа на калькуляторе	70	0	0
различная конторская работа (заполнение бланков, проверка)	58 – 10	0	0 – 0,1
черчение	70	0	0 – 0,1
Развлечения, занятия спортом:			
гимнастика	175 – 232	0 – 0,1	0,5 – 2
танцы	140 – 266	0	0,2 – 2
теннис	268	0 – 0,1	0,5 – 2
фехтование	410	0 – 0,1	0,5 – 2
баскетбол	440	0 – 0,1	1 – 3
борьба	510	0 – 0,1	0,2 – 0,3

Таблица Б.2 – Теплотехнические характеристики некоторых видов одежды (по данным Фангера) [69]

Тип одежды	R_o , кло*
Без одежды	0,0
Шорты	0,1
Типичная тропическая одежда: шорты, открытая у шеи рубашка с короткими рукавами, легкие носки и сандалии	0,3 – 0,4
Легкая летняя одежда: брюки из легкой ткани, открытая у шеи рубашка с короткими рукавами	0,5
Легкая рабочая одежда: шорты, носки, хлопчатобумажная рабочая рубашка и брюки	0,6
Типичная одежда делового человека	1,0
Теплая традиционная одежда делового человека: хлопчатобумажное белье, рубашка с длинным рукавом, шерстяные носки, туфли, костюм	1,5
Легкая спортивная одежда: хлопчатобумажная рубашка, шорты, носки, полуботинки	0,9
Теплая зимняя одежда в очень холодной местности (в полярной зоне)	3,0 – 4,0

*1 кло = 0,155 м²·К/Вт

ПРИЛОЖЕНИЕ В

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский политехнический университет»
(Московский Политех)

Б. Семеновская ул., д. 38, Москва, 107023
Тел. +7 495 223 05 23, Факс +7 499 785 62 34
www.mospolytech.ru | E-mail: mospolytech@mospolytech.ru

19.06.2017 г. № 19-17/4763

на _____ от _____

В Диссертационный совет Д 212.064.01
153003, г. Иваново,
ул. Рабфаковская, д. 34

Справка о внедрении

Настоящим подтверждаем, что результаты диссертационного исследования Пророковой М.В. на тему: «Повышение эффективности энергосберегающих мероприятий с учетом комфортности микроклимата» обладают актуальностью, представляют практический интерес и могут быть использованы при разработке методик и рекомендаций при оценке эффективности энергосберегающих мероприятий для объектов, подведомственных Министерству образования и науки Российской Федерации.

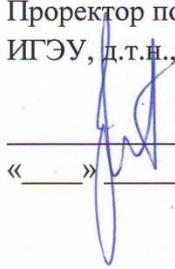
Директор Центра комплексной
энергоэффективности



В.В. Фролов

Исп. В.В. Фролов
Тел. 8 (495) 223-05-23 доб. 1623



ПРИЛОЖЕНИЕ Г**УТВЕРЖДАЮ**Проректор по научной работе
ИГЭУ, д.т.н., профессор



Тютиков В.В.
« _____ » _____ 2017 г.

УТВЕРЖДАЮГенеральный директор
АО «ИвГТЭ»



Филиппов Д.В.
« _____ » _____ 2017 г.

АКТ

передачи результатов диссертационной работы

Комиссия в составе: от акционерного общества «Ивгортеплоэнерго» (АО «ИвГТЭ») в лице главного инженера Мягкова А.А. и начальника производственно-технического отдела Буровой Е.А. с одной стороны и от федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» (ИГЭУ) в лице заведующего кафедрой ТОТ д.т.н., профессора Бухмирова В.В. и старшего преподавателя Пророковой М.В. с другой стороны, составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Пророковой М.В. переданы АО «ИвГТЭ» в виде отчёта, в котором содержатся рекомендации по повышению эффективности регулирования отопительной нагрузки зданий непромышленного назначения. Использование предложенного метода позволит при соблюдении требований к энергосбережению повысить комфортность внутренней среды помещений, предназначенных для длительного пребывания человека, за счет достижения заданного уровня комфортности микроклимата.

От АО «ИвГТЭ»

Главный инженер

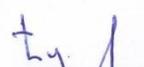


_____ Мягков А.А.

Начальник ПТО



_____ Бурова Е.А.

От ИГЭУЗав. кафедрой ТОТ
д.т.н., профессор


_____ Бухмиров В.В.

Ст. преп. кафедры ТОТ



_____ Пророкова М.В.

ПРИЛОЖЕНИЕ Д**УТВЕРЖДАЮ**Проректор по научной работе ИГЭУ,
д.т.н., профессор

Тютиков В.В.

« » _____ 2016 г.

УТВЕРЖДАЮДиректор НКО Фонд
«Энергоэффективность»

Феддер И.Э.

« » _____ 2016 г.

АКТ

передачи результатов диссертационной работы

Комиссия в составе: от НКО Фонд «Энергоэффективность» в лице первого заместителя директора Видякина Д.С. и заместителя директора по финансово-экономическим вопросам Корепанова Р.Б. с одной стороны и от ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» в лице заведующего кафедрой ТОТ д.т.н., профессора Бухмирова В.В. и аспиранта Пророковой М.В. с другой стороны составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы аспиранта Пророковой М.В. переданы НКО Фонд «Энергоэффективность» в виде отчёта, в котором содержатся рекомендации по совершенствованию методов оценки эффективности энергосберегающих мероприятий. Использование предложенного метода позволит повысить точность определения капитальных затрат проектов за счет учета необходимости внедрения сопутствующих мероприятий, а также улучшить санитарно-гигиенические показатели внутренней среды помещений за счет анализа изменения уровня комфортности под воздействием факторов, связанных с реализацией энергосберегающих мероприятий.

От НКО Фонд**«Энергоэффективность»**

Первый зам. директора

Видякин Д.С.

Зам. директора по
финансово-экономическим вопросам

Корепанов Р.Б.

От ИГЭУ

Зав. кафедрой ТОТ

д.т.н., профессор

Бухмиров В.В.

Аспирант

Пророкова М.В.

ПРИЛОЖЕНИЕ Е**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**

федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования

**«Ивановский государственный
энергетический университет
имени В.И. Ленина»
(ИГЭУ)**

ул. Рабфаковская, 34, г. Иваново, 153003
тел.: (4932) 32-72-43, факс: (4932) 38-57-01
e-mail: office@ispu.ru, <http://игэу.рф>, <http://ispu.ru>

№ 331 от 13.06.2017 г.
на № _____ от _____

В Диссертационный совет
Д 212.064.01
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская,
д. 34

Справка о внедрении

Настоящим подтверждаем, что результаты диссертационной работы Пророковой М.В. на тему: «Повышение эффективности энергосберегающих мероприятий с учетом комфортности микроклимата» посвящены актуальной теме энергосбережения и используются в учебно-методическом центре «Энергосбережение» Ивановского государственного энергетического университета имени В.И. Ленина при повышении квалификации энергоаудиторов и ответственных за энергосбережение по программам «Проведение энергетических обследований с целью повышения энергетической эффективности и энергосбережения» и «Основы энергосбережения и повышения энергетической эффективности в бюджетной сфере».

Пр

МС

ЭНУ

Заместитель директора

Учебно-методического центра ИГЭУ

«Энергосбережение»,

к.т.н.

Ю.С. Плетникова

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж**УТВЕРЖДАЮ**

Проректор по научной работе ИГЭУ

Готиков В.В.
« 2017 г.**АКТ ВНЕДРЕНИЯ**

Комиссия в составе заведующего кафедрой «Теоретические основы теплотехники» (ТОТ), д.т.н., проф. Бухмирова В.В., к.т.н., доцента Созиновой Т.Е., старшего преподавателя Пророковой М.В. составили настоящий акт о том, что на кафедре «Теоретические основы теплотехники» разработаны и внедрены метод математического моделирования процессов теплообмена в зданиях и метод определения фактического воздухообмена зданий с естественной вентиляцией, которые используются для закрепления материала в учебном процессе подготовки бакалавров и магистров по направлениям 13.03.01, 13.04.01 – «Теплоэнергетика и теплотехника» при выполнении студентами научно-исследовательских работ.

Заведующий кафедрой ТОТ

д.т.н., профессор

Бухмиров В.В.

Доцент кафедры ТОТ

к.т.н., доцент

Созинова Т.Е.

Старший преподаватель кафедры ТОТ

Пророкова М.В.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**

федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования

**«Ивановский государственный
энергетический университет
имени В.И. Ленина»
(ИГЭУ)**

ул. Рабфаковская, 34, г. Иваново, 153003
тел.: (4932) 32-72-43, факс: (4932) 38-57-01
e-mail: office@ispu.ru, http://игэу.рф, http://ispu.ru

№ 01-08-200 от 14.06.2019г.

на № _____ от _____

**В Диссертационный совет
Д 212.064.01**

153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская,
д. 34

Справка о внедрении

Выдана М.В. Пророковой для предоставления в Диссертационный Совет Д 212.064.01, свидетельствующая о том, что результаты диссертационной работы «Повышение эффективности энергосберегающих мероприятий с учетом комфортности микроклимата» использованы при разработке рекомендаций по повышению эффективности проектов, направленных на сокращение потребления тепловой энергии, и при проектировании энергосберегающих решений для Ивановского государственного энергетического университета имени В.И. Ленина».

Главный инженер Ивановского
государственного энергетического
университета имени В.И. Ленина

В.А. Тибайкин