

На правах рукописи



ПРОРОКОВА Мария Владимировна

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

Специальность: 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново – 2017

Работа выполнена на кафедре «Теоретические основы теплотехники» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор **БУХМИРОВ Вячеслав Викторович**

Официальные оппоненты:

ГАРЯЕВ Андрей Борисович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», заведующий кафедрой «Тепломассообменные процессы и установки»

ШАРАПОВ Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет», заведующий кафедрой «Теплогазоснабжение и вентиляция»

Ведущая организация: **Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»**, г. Томск

Защита состоится 6 октября 2017 года в 15-00 на заседании диссертационного совета Д 212.064.01 при ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, корпус «Б», аудитория Б-237

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, ИГЭУ, Ученый совет. Тел.: (4932) 38-57-12, 26-98-61, факс: (4932) 38-57-01. E-mail: uch_sovet@ispu.ru .

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ивановского государственного энергетического университета.

Диссертация размещена: http://ispu.ru/files/Dissertaciya_ProrokovaMV_0.pdf

Автореферат размещен: www.ispu.ru

Автореферат разослан «__» _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.064.01,
доктор технических наук, доцент



Бушуев
Евгений Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 здание 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 человека. 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 непроизводственных (жилых, общественных и административных) зданий является актуальной задачей. Актуальность работы также подтверждается развитием энергосервисной деятельности в Российской Федерации, в рамках которой до заключения энергосервисного договора на реализацию проекта энергосбережения необходимо про-

гнозировать 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 непроизводственного назначения.

Предмет исследования. Процессы тепломассообмена при формировании микроклимата в зданиях непроизводственного назначения.

Цель диссертационной работы. Повышение энергоэффективности непроизводственных 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 непроизводственного 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 непроизводственного 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 фи-

биологические 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 тепломассопереноса 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 тепломассообмена 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 непромышленного 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 непромышленных 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 «Тепло-массоперенос 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.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформированы цели и задачи исследования, отмечена научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе проанализировано современное состояние нормативно-правового обеспечения энергосбережения и повышения энергетической эффективности в Российской Федерации, рассмотрена структура энергопотребления, а также основные направления повышения эффективности использования топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) для объектов непроизводственного назначения. Выполнен обзор наиболее распространенных методов оценки эффективности внедрения энергосберегающих мероприятий, выявлены их достоинства и недостатки. Проанализированы результаты внедрения энергосберегающих мероприятий в зданиях, предназначенных для длительного пребывания людей, сделан вывод о необходимости совместного решения задач энергосбережения и обеспечения комфортных для человека параметров внутренней среды помещений.

Выполнен анализ подходов к определению комфортных для человека параметров микроклимата: с точки зрения нормативного обеспечения и теоретико-экспериментальных исследований. Большой вклад в развитие указанной проблемы внесли работы Ф.А. Кренко, С. Олесена, П.О. Фангера, П.Е. Мак Нолла, Ф. Гэя, Т. Бедфорда, И. Гриффитса, Д. Мак Интейра, С.Х. Гейджа, Б. Харрингтона, А.М. Гримитлина, В.А. Максимовича, В.Н. Богословского, Ю.А. Табунщикова.

Рассмотрены основные подходы к прогнозированию параметров теплового, влажностного и воздушного режимов помещений в зданиях непроизводственного назначения. Особое внимание уделено работам В.М. Ильинского, В.Н. Богословского, Я.Д. Пекера, Ю.А. Табунщикова, В.И. Полежаева, Б.М. Берковского, С. Патанкара, Д.Б. Сполдинга. Выбран программно-вычислительный комплекс для решения задачи прогнозирования параметров микроклимата в помещении здания после реализации энергосберегающих мероприятий.

Во второй главе работы предложен новый метод оценки комфортности микроклимата в зданиях непроизводственного назначения. Предложено оценивать влияние параметров микроклимата на человека в помещении по значению уровня комфортности микроклимата ($U_{ком}$) – интегрального показателя, учитывающего влияние параметров внутренней среды на тепловой комфорт человека, качество воздушной среды и основные вредности, характерные для помещений жилых, общественных и административных зданий:

$$U_{ком} = \beta(K_{ТК} \cdot \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 + K_{КС} \cdot \varepsilon_3), \quad (1)$$

где $K_{ТК}$ – коэффициент комфортности теплового состояния человека, который изменяется от минус 1 до плюс 1 (-1 ÷ +1). При этом $K_{ТК} = 0$ соответствует абсолютно комфортному тепловому состоянию человека; $K_{ТК} = -1$ – ха-

рактеризует полное отсутствие комфорта при недостатке теплоты; $K_{TK} = 1$ – характеризует 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»; имеет знак « \rightarrow » в случае недостатка теплоты ($K_{TK} < 0$) и знак « \leftarrow » при избытке теплоты ($K_{TK} > 0$); ε_3 – поправка на дополнительные вредности, снижающие качество воздушной среды (пыль и прочие примеси); β – коэффициент, учитывающий тип зданий (для зданий непроизводственного назначения $\beta = 1$, а для промышленных зданий $\beta > 1$).

Коэффициент комфортности теплового состояния человека K_{TK} зависит от интенсивности тепломассообмена человека с внутренней средой помещения, параметры которой находят или экспериментально, или при помощи математического моделирования микроклимата помещения.

Определение уровня комфортности микроклимата включает четыре этапа.

На первом этапе устанавливают характеристики работ, выполняемых в обследуемом помещении (преимущественный тип работ, метаболическую теплоту, зависящую от типа выполняемых работ, возраста и пола человека, коэффициент полезного действия механической работы и относительную скорость движения человека в неподвижном воздухе).

На втором этапе измеряют температуру воздуха, относительную влажность воздуха, температуру поверхности одежды, подвижность воздуха, температуру ограждающих поверхностей, концентрацию углекислого газа в воздухе обследуемого помещения и в наружном воздухе.

На третьем этапе расчета уровня комфортности находят коэффициент теплового комфорта K_{TK} по составляющим уравнения теплового баланса человека в помещении.

На четвертом этапе расчета уровня комфортности определяют коэффициент качества воздушной среды $K_{КС}$ по значению концентрации углекислого газа в воздушной среде или по значению фактического воздухообмена объекта, а также поправки, учитывающие воздействие на человека присутствующих в помещении нагретых или охлажденных поверхностей ε_1 , неравномерность их расположения относительно человека ε_2 , а также наличие в воздухе прочих примесей (пыль, токсичные вещества) ε_3 .

Во второй главе диссертации также приведены результаты экспериментального исследования микроклимата в помещениях общественного здания, при проведении которого фиксировались температура, относительная влажность и подвижность воздуха в помещении, температура ограждающих поверхностей, расположение отопительных приборов, оконных и дверных блоков, а также параметры наружного воздуха. Одновременно с проведением физического эксперимента был выполнен опрос присутствующих в помеще-

нии людей о степени комфортности микроклимата. Результаты эксперимента использованы для разработки шкалы, ставящей в соответствие численное значение уровня комфортности микроклимата и характеристику субъективного ощущения комфорта у человека – степень комфортности (таблица 1).

Выполнен анализ влияния на уровень и степень комфортности микроклимата факторов, связанных с физиологическими особенностями человека (пол, возраст) и типом выполняемой работы.

Таблица 1. Уровень и степень комфортности микроклимата

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

Приведены результаты анализа влияния на уровень комфортности микроклимата характеристик внутренней среды, определяющих величину коэффициентов теплового комфорта и качества воздушной среды, а также поправок на основные вредности ε_1 , ε_2 и ε_3 (температуры нагретых и охлажденных поверхностей, концентрации примесей в воздухе помещения). Отмечено, что влияние указанных составляющих уровня комфортности микроклимата на результаты расчета для зданий непроизводственного назначения не превышает 30% от величины основных коэффициентов K_{TK} и $K_{КС}$.

В заключение второй главы приведен пример определения уровня комфортности микроклимата помещения общественного здания, а также оценка уровня комфортности микроклимата по показателям ASHRAE:

Predicted Mean Vote (PMV, ожидаемая средняя оценка степени комфорта) и Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD, ожидаемый процент неудовлетворенных микроклиматом). Сопоставимость результатов оценки комфортности микроклимата по разработанному в диссертации критерию и по используемым в настоящее время критериям PMV и PPD подтверждает возможность применения уровня комфортности микроклимата для анализа внутренней среды помещений.

В третьей главе приведена математическая модель процессов тепломассообмена при формировании микроклимата помещений непроизводственного назначения для прогнозирования параметров внутренней среды после внедрения энергосберегающих мероприятий. Математическое описание включает уравнения неразрывности, переноса импульса, переноса энергии и переноса компонента смеси. При записи уравнений приняты следующие допущения: воздушная среда в помещении представляет собой четырехкомпонентную смесь азота (N_2), кислорода (O_2), углекислого газа (CO_2) и водяного пара (H_2O); плотность компонентов смеси и сама смесь подчиняются закону идеального газа; газовая смесь в помещении не является диатермичной средой; диффузионный перенос воздуха через твердые элементы ограждающих конструкций

(стены, полотно оконного блока) отсутствует; приток воздуха в помещение осуществляется через щелевой канал по периметру оконного блока (оконных блоков); инверсия воздушного потока в приточных отверстиях отсутствует; выход потока воздуха из помещения осуществляется через вентиляционные каналы и щелевое отверстие по периметру дверного блока (дверных блоков).

Для описания турбулентных свойств текучей среды на основе тестовых расчетов выбрана $k-\varepsilon$ модель турбулентности.

Математическая модель реализована в программно-вычислительном комплексе (ПБК) ANSYS Fluent.

Геометрическая модель экспериментального помещения была построена в AutoCAD (рис. 1, а) и экспортирована в ANSYS Fluent. План помещения и внешний вид расчетной сетки приведены на рисунках 1,а и 1,б.

Проверка адекватности разработанной математической модели выполнена путем сравнения результатов расчета параметров микроклимата (температуры, скорости, содержания в воздухе влаги) в ПБК с результатами экспериментального определения указанных величин. В рамках экспериментов при различных типах отопительных приборов были измерены характеристики приточного воздуха и температура ограждающих помещение поверхностей, а также температура воздуха, относительная влажность и подвижность воздуха в помещении в точках 13, 14, 15 и 16 (рис. 1,в) на расстоянии 0,1, 0,6 и 1,7 м от поверхности пола в стационарном режиме теплообмена с окружающей средой.

Для получения данных о фактическом воздухообмене объектов моделирования, а также для оценки его влияния на комфортность микроклимата по проекту ИГЭУ была изготовлена установка, принципиальная схема которой показана на рисунке 2.

Поскольку в качестве объекта исследования рассматривались жилые, общественные и административные здания, было принято, что воздухообмен помещения определяется воздухопроницаемостью ограждающих конструкций.

Определение воздухообмена объектов было выполнено в соответствии с ГОСТ 31167 «Здания и сооружения. Методы определения воздухопроницаемости ограждающих конструкций в натуральных условиях». Фактический воздухообмен экспериментальных помещений сравнивался с санитарно-эпидемиологическими нормами и воздухообменом по требованиям энергосбережения.

Экспериментальные параметры фактического воздухообмена были использованы при задании граничных условий разработанной математической модели в программно-вычислительном комплексе.

В третьей главе работы также представлены результаты экспериментального исследования микроклимата в помещении общественного здания с естественной вентиляцией.

На рисунке 3 приведено изменение температуры воздуха по высоте z экспериментального помещения в контрольных точках (см. рис. 1, в).

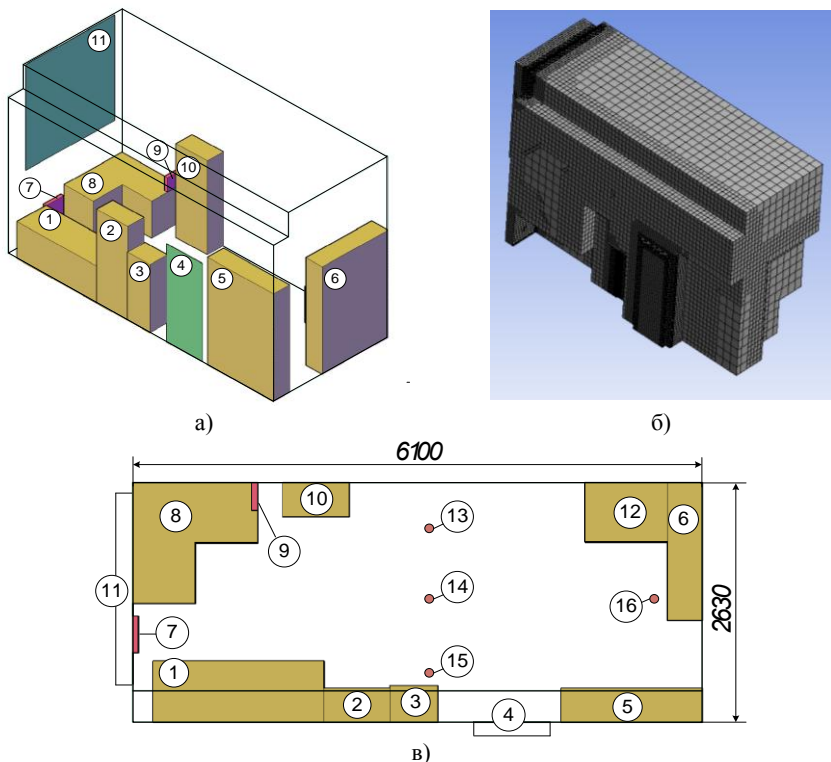


Рис. 1. Геометрическая модель (а), расчетная сетка (б) и план (в) экспериментального помещения: 1 – рабочий стол; 2 – шкаф; 3 – сейф; 4 – входная дверь; 5,6 – стеллаж; 7 – отопительный прибор (масляный радиатор); 8 – рабочий стол; 9 – отопительный прибор (тепловентилятор); 10 – шкаф; 11 – окно; 12 – стол; 13, 14, 15 – место установки измерительных приборов

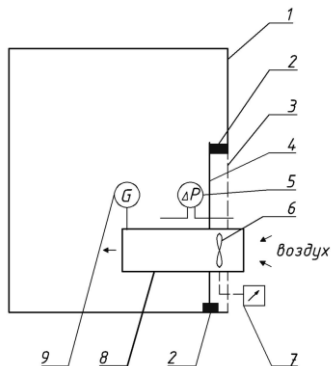


Рис. 2. Установка для определения воздухопроницаемости ограждающих конструкций: 1 – ограждающие конструкции помещения; 2 – уплотнение; 3 – дверной проем; 4 – воздухопроницаемая раздвижная дверь; 5 – дифманометр; 6 – осевой вентилятор; 7 – регулятор числа оборотов вентилятора; 8 – труба для выравнивания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

Удовлетворительная корреляция результатов расчета и эксперимента, а также проверка математической модели по критерию Фишера позволяет сделать вывод о ее адекватности и о возможности использования модели тепло-

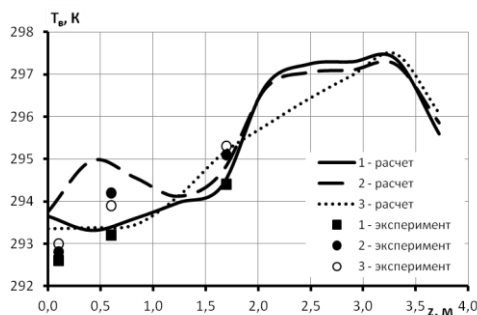


Рис. 3. Температура воздуха в экспериментальном помещении общественного здания

новый метод оценки эффективности внедрения энергосберегающих мероприятий для жилых, общественных и административных зданий, основанный на расчете уровня комфортности микроклимата. Предлагаемый метод позволяет повысить точность оценки технического и экономического эффекта от реализации потенциала энергосбережения за счет использования в расчете фактических параметров внутренней среды до и после внедрения энергосберегающих мероприятий. При этом методом математического моделирования определяются требуемые параметры микроклимата для обеспечения комфортной внутренней среды при минимальном энергопотреблении.

Выполнена оценка эффективности внедрения типовых энергосберегающих мероприятий для общественного здания (утепление фасада здания и замена окон). На рисунке 4 в качестве примера приведены результаты моделирования в ANSYS Fluent внутренней среды помещения учебного корпуса ИГЭУ до и после реализации энергосберегающего мероприятия по замене деревянных окон на ПВХ-стеклопакеты. Параметры микроклимата и температурное поле объекта до реализации энергосберегающего проекта показаны на рисунке 4, а, после – на рисунке 4, б. За счет герметизации здания воздухообмен снизился, что привело к увеличению температуры и концентрации углекислого газа и снижению подвижности воздуха. Уровень комфортности микроклимата в результате внедрения энергосберегающего мероприятия изменился с $U_{ком,1} = 0,062$ до $U_{ком,2} = 0,353$, что говорит об ухудшении качества микроклимата. Для создания комфортной внутренней среды при минимальных энергозатратах необходимо в помещении поддерживать $U_{ком} = -0,1$, что соответствует параметрам микроклимата, указанным на рисунке 4, в. Мето-

массообмена для расчета параметров микроклимата после внедрения энергосберегающих мероприятий.

В четвертой главе рассмотрены направления повышения эффективности внедрения энергосберегающих мероприятий при обеспечении заданного уровня комфортности микроклимата объектов исследования.

Во-первых, разработан но-

дом вариантных расчетов в ПБК ANSYS Fluent установлено, что для обеспечения характеристик внутренней среды, приведенных на рисунке 4, в, отопительная нагрузка должна быть снижена на 16%. На основе результатов математического моделирования выполнен расчет технических и экономических показателей внедрения энергосберегающего проекта. 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.

Во-вторых, метод расчета уровня комфортности микроклимата, предложенный во второй главе работы, реализован в виде компьютерной программы «Определение уровня и степени комфортности помещений жилых, общественных и административных зданий» (УСК01) (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016615407 от 23 мая 2016 г).

В-третьих, предложен графический метод определения уровня комфортности микроклимата и комфортных для человека параметров внутренней среды, которые могут быть использованы как при регулировании систем энергоснабжения объекта, так и в качестве расчетных при оценке эффективности энергосберегающих мероприятий. Например, на рисунке 5 в точке А существует сочетание параметров воздушной среды для поддержания комфортного микроклимата. Параметры микроклимата в точках В и С лежат за диапазоном комфортного микроклимата ($U_{ком} > 0,3$), но входят в диапазон «оптимальных» (точка В) и допустимых (точка С) параметров внутренней среды по ГОСТ 30494 «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях». Поэтому можно сделать вывод о том, что поддержание в помещении параметров микроклимата, соответствующих требованиям нормативных документов, не всегда будет обеспечивать комфортный для человека тепло-влажностный и воздушный режим внутренней среды.

В-четвертых, предложена концепция измерительно-вычислительного комплекса (ИВК) для измерения уровня и степени комфортности микроклимата (УСКМ) в помещениях зданий непромышленного назначения. В настоящее время концепция ИВК реализована на базе метеометра МЭС-200А и компьютерной программы УСК01. Измерительно-вычислительный комплекс позволяет определить качество микроклимата в помещении по комплексному критерию – уровню и степени комфорта и разработать предварительный перечень энергосберегающих мероприятий в целях повышения комфортности внутренней среды помещений.

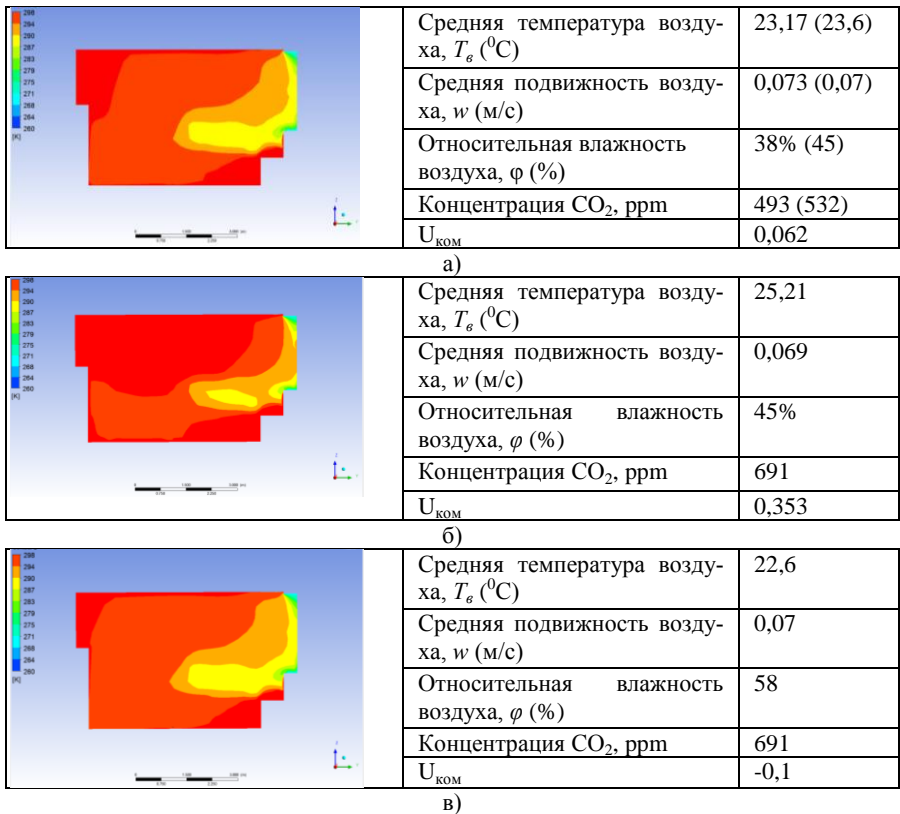


Рис. 4. Параметры микроклимата в помещении ИГЭУ до и после внедрения энергосберегающего мероприятия по замене окон и визуализация температурного поля в ANSYS Fluent: а – до внедрения мероприятия (в скобках указаны результаты экспериментального определения параметров микроклимата); б – после внедрения мероприятия; в – после внедрения мероприятия и при $U_{\text{КОМ}} = -0,1$

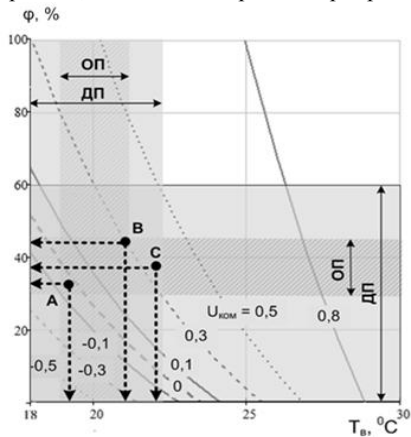


Рис. 5. Номограмма для определения температуры и относительной влажности воздуха для разных значений уровня комфортности: ОП и ДП – соответственно области оптимальных и допустимых значений температуры и относительной влажности воздуха для холодного периода года в помещениях 2-ой категории по ГОСТ – 30494

В пятых, предложена принципиальная схема теплового пункта с автоматическим регулированием отопительной нагрузки в зависимости от температуры наружного воздуха и заданного уровня комфортности в контрольных помещениях.

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 непроизводственных 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 непроизводственного 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 тепломассообмена 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 использования 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 позволя-

ет 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.

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования. В данной работе предложен метод оценки эффективности внедрения энергосберегающих мероприятий для зданий непромышленного назначения. В дальнейшем планируется адаптировать данный метод для производственных зданий, в которых на характеристики теплового, влажностного и воздушного режимов помещения влияют не только факторы, связанные с функционированием систем энергоснабжения, формирующих микроклимат, но и технологические процессы. Концепция измерительно-вычислительного комплекса должна быть реализована в виде опытного образца прибора для определения уровня комфортности микроклимата.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи в периодических изданиях, рекомендованных ВАК

1. **Пророкова, М.В.** Энергосбережение и качество микроклимата / **М.В. Пророкова, В.В. Бухмиров** // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2015. – № 2 (63). – С. 32-35.

2. Бухмиров, В.В. Оценка микроклимата в помещениях жилых, общественных и административных зданий / В.В. Бухмиров, **М.В. Пророкова** // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2015. – № 4. – С. 5-10.

Научные статьи, опубликованные в изданиях, индексируемых в базе данных SCOPUS

3. Bukhmirov, V.V. Features of determining the nonmanufacturing premises comfort level by the integrated microclimate quality criteria / V.V. Bukhmirov, **M.V. Prorokova** //

EPJ Web of Conferences: Thermophysical Basis of Energy Technologies-2014. – 2015. – № 82. – DOI: 10.1051/epjconf/20158201052.

4. **Prorokova, M.V.** Calculation of Level of Comfort of the Micro-Climate in Buildings During the Estimation of the Energy-Saving Measures / **M.V. Prorokova**,

5. V.V. Bukhmirov // EPJ Web of Conferences: Thermophysical Basis of Energy Technologies-2015. – 2016. – № 110. – DOI: 10.1051/epjconf/201611001063.

6. **Prorokova, M.** Simulation of Room Climate of Public Buildings / **M. Prorokova**, V. Bukhmirov // MATEC Web of Conferences: Heat and Mass Transfer in the System of Thermal Modes of Energy - Technical and Technological Equipment (HMTTSC-2016). – 2016. – № 72. – DOI: 10.1051/mateconf/20167201090.

7. **Prorokova, M.** Simulation of the processes of heat- and the mass transfer in the rooms of public building with the natural ventilation / **M. Prorokova**, V. Bukhmirov // MATEC Web of Conferences: Thermophysical Basis of Energy Technologies – 2016. – 2017. – № 92. – DOI: 10.1051/mateconf/20179201007.

Публикации в других изданиях

8. **Пророкова, М.В.** Определение воздухопроницаемости аудиторий цокольного этажа корпуса «Б» ИГЭУ / **М.В. Пророкова**, Г.А. Родионов, В.В. Бухмиров // Региональная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2012»: Материалы конференции. – Иваново: ФГБОУ ВПО Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина. – 2012. – Т. 1, Ч. 2. – С. 156-159.

9. **Пророкова, М.В.** Исследование воздухообмена общественных зданий / **М.В. Пророкова**, Г.А. Родионов, В.В. Бухмиров // Энергетическое обследование как первый этап реализации концепции энергосбережения: материалы Международной молодежной конференции / Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во ООО «СПБ Графикс», 2012. – С.245-247.

10. **Пророкова, М.В.** О важности согласованной работы систем отопления и вентиляции / **М.В. Пророкова**, В.В. Бухмиров // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Девятнадцатая Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов: Тезисы докладов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2013. – Т. 3. – С. 170.

11. **Пророкова, М.В.** Определение воздухопроницаемости ограждающих конструкций вводимого в эксплуатацию многоквартирного дома / **М.В. Пророкова**, А.В. Данилов, В.В. Бухмиров // Тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных "Энергия-2013". – Иваново: ФГБОУ ВПО Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина, 2013. – Т. 1, Ч. 2. – С.83-85.

12. Бухмиров, В.В. Контроль воздухообмена общественных и административных зданий / В.В. Бухмиров, **М.В. Пророкова** // Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности: сборник научных трудов Шестой Международной научно-технической конференции. – Ульяновск: УлГТУ, 2013. – С.82-85.

13. Бухмиров, В.В. Результаты энергоаудита зданий и сооружений бюджетных учреждений / В.В. Бухмиров, О.Н. Махов, **М.В. Пророкова** // Материалы Международной научно-технической конференции "Состояние и перспективы развития электротехнологии" (XVII Бенардосовские чтения). – 2013. – Т.2. – С.222-225.

14. **Пророкова, М.В.** Анализ методик определения эффективности энергосберегающих мероприятий / **М.В. Пророкова**, В.В. Бухмиров // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Девятнадцатая международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов: тезисы докладов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2014. – Т.3. – С. 184.

15. **Пророкова, М.В.** Учет микроклимата при внедрении энергосберегающих мероприятий / **М.В. Пророкова**, В.В. Бухмиров // Материалы докладов X Международной

молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» / под. общ. ред. ректора КГЭУ Э.Ю. Абдуллазянова. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2015. – Т.2. – 154-155.

16. Бухмиров, В.В. Способ оценки эффективности работы систем отопления, вентиляции и кондиционирования жилых, общественных и административных зданий / В.В. Бухмиров, **М.В. Пророкова** // Материалы Международной научно-технической конференции "Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии" (XVIII Бенардосовские чтения). – 2015. – Т.2. – С.129-133.

17. Бухмиров, В.В. Анализ реализации энергосберегающих мероприятий в образовательном учреждении с учетом обеспечения требуемого воздухообмена / В.В. Бухмиров, **М.В. Пророкова** // Вестник энергоэффективности МИНОБРНАУКИ России. – 2015. – № 1 (01). – С. 18-23.

18. Бухмиров, В.В. Выбор расчетных параметров микроклимата при оценке эффективности энергосберегающих мероприятий / В.В. Бухмиров, **М.В. Пророкова** // Энергосбережение – теория и практика: Труды Восьмой Международной школы-семинара молодых ученых и специалистов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2016. – С. 25-27.

19. **Пророкова, М.В.** Метод оценки эффективности внедрения энергосберегающих мероприятий для зданий, предназначенных для долговременно пребывания человека / **М.В. Пророкова, В.В. Бухмиров** // Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности: Седьмая Международная научно-техническая конференция: сборник научных трудов. – Ульяновск: УлГТУ, 2017. – Т.1. – С. 64-68.

20. **Пророкова, М.В.** Оценка эффективности внедрения энергосберегающих мероприятий / **М.В. Пророкова, В.В. Бухмиров** // Материалы Международной научно-технической конференции "Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии" (XIX Бенардосовские чтения). – 2017. – Т.2. – С.237-240.

Результаты интеллектуальной деятельности

21. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016615407, Определение уровня и степени комфортности помещений жилых, общественных и административных зданий (УСК01) / Бухмиров В.В., **Пророкова М.В.**; заявитель и патентообладатель ИГЭУ – № 2016615407; заявл. 24.03.2016; опубл. 23.05.2016.

ПРОРОКОВА Мария Владимировна

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ МЕРОПРИЯТИЙ С УЧЕТОМ КОМФОРТНОСТИ МИКРОКЛИМАТА

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать 06.07.2017 г. Формат 60x84¹/₁₆.

Печать плоская. Усл. печ. л. 1,16. Тираж 100 экз. Заказ № _____
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет
имени В.И. Ленина»

153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34.

Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ