

На правах рукописи



**СВИРИН МАКСИМ ВАЛЕРЬЕВИЧ**

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ПОТРЕБНОСТИ В ТЕПЛОВОЙ  
ЭНЕРГИИ НА ОТОПЛЕНИЕ ЖИЛЫХ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ЗДАНИЙ  
В ПЕРЕХОДНЫЙ ПЕРИОД ГОДА**

**Специальность 2.1.3 – Теплоснабжение, вентиляция,  
кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение**

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

**Белгород – 2024**

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»

**Научный руководитель:**

**Семенов Артём Сергеевич,**  
кандидат технических наук

**Официальные оппоненты:**

**Корниенко Сергей Валерьевич,**  
доктор технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой «Архитектура  
зданий и сооружений» ФГБОУ ВО  
«Волгоградский государственный  
технический университет»

**Оверченко Мира Викторовна,**  
кандидат технических наук,  
старший преподаватель кафедры  
«Проектирование зданий и  
строительная физика» ФГБОУ ВО  
«Донбасская национальная академия  
строительства и архитектуры»

**Ведущая организация:**

**ФГАОУ ВО «Северо-Восточный  
федеральный университет им. М.К.  
Аммосова»**

Защита состоится «31» мая 2024 года в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.276.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» по адресу: 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, ауд. 214 ГК.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» и на сайте: [https://gos\\_att.bstu.ru/dis/Svirin](https://gos_att.bstu.ru/dis/Svirin)

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ года

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Суслов Денис Юрьевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность избранной темы.** Проблема создания комфортных условий в жилых помещениях является одной из наиболее значимых и актуальных задач строительства. При этом распространенные в РФ централизованные системы отопления не всегда обеспечивают оптимальные условия для жильцов, что приводит к дискомфорту, низкому качеству труда и отдыха, ухудшению физического и психологического самочувствия людей.

Согласно данным Росстата за 2022 г., централизованным отоплением в Российской Федерации оборудовано 68,1% домохозяйств, из которых 29,2% используют дополнительные источники тепла. Согласно данным ВЦИОМ за 2022-2023 г., качество услуги по предоставлению тепловой энергии на отопление снизилось по мнению 10% респондентов, 61% не заметил изменений. При этом качеством жилищно-коммунальных услуг в той или иной мере недовольствованы 36% опрошенных.

Дискомфорт устраняется дополнительными источниками тепла, в основном электрообогревателями, которые менее энергоэффективны и приводят к повышенному риску пожаров. Согласно докладу МЧС России за 2022 год, общее число пожаров в жилом секторе составило 43,04%, из них 27,38% - в многоквартирных домах, из-за аварийного режима работы электрического оборудования в зданиях жилого назначения происходят 39,55% пожаров.

Согласно Постановлению Правительства РФ от 06.05.2011 №354, центральное отопление должно быть включено при среднесуточной наружной температуре воздуха ниже 8°C в течение 5 суток подряд. Тем не менее, региональные власти самостоятельно принимают решение о начале и окончании отопительного сезона местными законодательными актами. При этом не получают должного внимания различия в конструктивных особенностях зданий и индивидуальных потребностей жильцов в тепловой энергии, что приводит к нарушению их теплового комфорта.

Работа выполнена в рамках программы развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова, темы НИР «Системы мониторинга и анализа состояния инженерных систем и тепловоздушного режима эксплуатируемых зданий» (номер регистрации НИР № А-18/22 от 10 января 2022 г.), гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации НШ-25.2022.4 «Разработка научно-технических основ создания передовых технологий совершенствования и конструирования систем аспирации, вентиляции, теплогазоснабжения».

**Степень разработанности темы.** В вопросах повышения эффективности и качества отопления значительный вклад внесли Ливчак В.И., Соколов Е.Я., Зингер Н.М., Сканави А.Н., Туркин В.П., Андриюченко А.И., Богословский В.Н., Белинский С.Я., Табунщиков Ю.А. и др. Изучением способов повышения эффективности управления отоплением зданий занимались Панферов В.И., Табунщиков Ю.А., Шнайдер Д.А., Глухов В.Н., Тверской М.М., Казаринов Л.С., Dounis A.I., Mathews E.H., Fanger P.O. и др. Способы организации комфортного воздушно-теплового режима помещений изучали Богословский В.Н., Васильев Б.Ф., Батурин В.В., Ливчак И.Ф., Лицкевич В.Е., Поз М.Я., Титов В.П., Талиев

В.Н. и другие. В области изучения теплового комфорта человека работали Горомосов М.С., Bedford T., Gagge A.P., McNall P.E., Olesen S., Nevins R.G., Fanger P.O. и др.

**Гипотеза** состоит в том, что учет конструктивных особенностей зданий и адаптивных потребностей жильцов позволит удовлетворить потребность в тепловой энергии на отопление жилых эксплуатируемых зданий в переходный период года.

**Цель исследования** заключается в разработке методики расчета потребности в тепловой энергии на отопление жилых эксплуатируемых зданий в переходный период года.

**Задачи исследования:**

1. Выполнить совокупный анализ развития систем теплоснабжения в России, включая текущие методы автоматизации и определение тенденций развития инженерных сетей в жилых зданиях, а также возможностей количественной оценки уровня теплового комфорта.

2. Уточнить математическую модель расчета параметров микроклимата с учетом количественной оценки уровня теплового комфорта нестационарного теплового режима помещений.

3. Экспериментально подтвердить адекватность предложенной математической модели, применяя процедуру валидации и верификации результатов.

4. Разработать методики расчета определения начала периода потребности в тепловой энергии здания и тепловых потоков с учетом адаптивных запросов жильцов, провести анализ эффективности разработанных методик на реальных примерах.

5. Разработать техническое решение, позволяющее осуществлять подачу тепловой энергии до начала и после официального окончания отопительного сезона при нарушении условий теплового комфорта в жилых зданиях.

**Научная новизна исследования** заключается в достижении следующих результатов:

1. Уточнена математическая модель расчета параметров микроклимата с учетом количественной оценки уровня теплового комфорта нестационарного теплового режима помещений, позволяющая учитывать изменения в параметрах микроклимата и их влияние на индивидуальное субъективное состояние теплового комфорта проживающих.

2. Разработано программно-алгоритмическое обеспечение для анализа параметров отопительного сезона по архиву климатических данных, которое позволяет производить расчет среднесуточных, среднемесячных температур наружного воздуха, определять даты начала и окончания отопительного сезона и иные параметры.

3. Получена аналитическая зависимость внутренних бытовых тепловыделений от расчетной заселенности помещения, которая позволяет уточнить расчет тепловых нагрузок на систему отопления и способствует созданию более комфортных и энергоэффективных условий проживания.

4. Установлена зависимость начала периода потребности в тепловой энергии и индивидуальных особенностей здания: уровень теплоизоляции ограждающих конструкций, класс энергоэффективности зданий.

5. Разработан вычислительный алгоритм для определения требуемой тепловой энергии на отопление от индивидуальных особенностей людей с учетом пола, возраста (от 3 до 75+ лет) и степени их физической активности, который способствует более адаптивному подходу к обеспечению теплового комфорта, учитывая индивидуальные запросы жильцов.

**Теоретическая значимость работы** состоит в развитии методов прогнозирования состояния теплового комфорта в помещении, математического моделирования нестационарного теплового режима зданий с учетом количественной оценки уровня теплового комфорта, получении новых закономерностей температуры начала периода потребности в тепловой энергии от классов энергоэффективности зданий, термодинамически равновесных температур внутреннего воздуха от возраста человека, внутренних бытовых тепловыделений от расчетной заселенности помещения.

**Практическая значимость** диссертационного исследования состоит в разработке методики определения температуры начала периода потребности в тепловой энергии здания; разработке методики определения потребности в теплоте с учетом адаптивных запросов жильцов; разработке программного обеспечения для анализа параметров отопительного сезона по архиву климатических данных (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2022682711); разработке улучшенной конструкции индивидуального теплового пункта четырёхтрубной системы теплоснабжения, позволяющей осуществлять подачу отопления в многоквартирных домах с центральной системой до начала и после официального окончания отопительного сезона.

**Результаты исследований внедрены** в компании ООО «Интелл-Сервис», при выполнении НИР заказчика ООО «Застройщик Белогорья», в учебный процесс при подготовке студентов направления 08.03.01 «Строительство» профиля «Теплогазоснабжение и вентиляция», 08.04.01 «Строительство» профиля «Теплогазоснабжение населенных мест и предприятий», «Системы обеспечения микроклимата зданий и сооружений» в лекционных занятиях и проведении практических работ.

**Методология и методы исследований** включали: аналитическое обобщение известных научных и технических результатов, а также глубоких фундаментальных исследований тепломассообменных процессов, происходящих в зданиях; прогнозирование изменений температур воздуха в помещениях; численное моделирование процессов в помещениях с применением ЭВМ. Также используются методы планирования эксперимента и статистической обработки данных экспериментальных методов.

**Область исследования** соответствует требованиям паспорта научной специальности ВАК: 2.1.3 – Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение: п.1. «Климатологическое обеспечение зданий. Тепломассообмен и гидроаэромеханика систем теплогазоснабжения и вентиляции, тепло и холодогенерирующего оборудования, ограждающих

конструкций. Исследования теплового, воздушного, влажностного режимов помещений, зданий и сооружений», п.4. «Разработка математических моделей, методов, алгоритмов и компьютерных программ, использование численных методов, с проверкой их адекватности, для расчета, конструирования и проектирования систем теплоснабжения, вентиляции, кондиционирования воздуха, газоснабжения и освещения, охраны воздушного бассейна, защиты от шума зданий и сооружений, повышения их надежности и эффективности».

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Математическая модель расчета параметров микроклимата с учетом количественной оценки уровня теплового комфорта нестационарного теплового режима помещений, позволяющая учитывать изменения в параметрах микроклимата и их влияние на индивидуальное субъективное состояние теплового комфорта проживающих.

2. Программно-алгоритмическое обеспечение для анализа параметров отопительного сезона по архиву климатических данных, которое позволяет производить расчет среднесуточных, среднемесячных температур наружного воздуха, определять даты начала и окончания отопительного сезона и иные параметры.

3. Аналитическая зависимость внутренних бытовых тепловыделений от расчетной заселенности помещения, которая позволяет уточнить расчет тепловых нагрузок на систему отопления и способствует созданию более комфортных и энергоэффективных условий проживания.

4. Зависимость начала периода потребности в тепловой энергии и индивидуальных особенностей здания: уровень теплоизоляции ограждающих конструкций, класс энергоэффективности зданий.

5. Методики определения температуры начала периода потребности в тепловой энергии здания и определения потребности в теплоте с учетом адаптивных запросов жильцов, которые способствуют более адаптивному подходу к обеспечению теплового комфорта, учитывая индивидуальные запросы жильцов.

6. Конструкция индивидуального теплового пункта, позволяющая осуществлять подачу тепловой энергии на отопление до начала и после официального окончания отопительного сезона при нарушении условий теплового комфорта в жилых зданиях.

**Достоверность результатов** обоснована использованием в основе методологии исследования законов термодинамических процессов, а также современной теории теплообмена и теплопередачи, а также достаточной степенью сходимости аналитических выводов и результатов экспериментов.

**Апробация работы:** основные положения и результаты работы докладывались и получили положительную оценку на конференциях IV International Scientific and Technical Conference “Energy Systems” (2019), Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова (2020), Journal of Physics: Conference Series (2021), XV Международный молодежный форум «Образование. Наука. Производство»

(2021), Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова (2022).

**Публикации.** Результаты исследований, отражающие основные положения диссертационной работы, изложены в 16 научных публикациях, из которых 3 опубликованы в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ, 2 – в изданиях, индексируемых базой данных Scopus. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Личный вклад автора** состоит в определении цели и задач диссертационного исследования, осуществлении анализа научной литературы, выборе методологии и объектов исследования, разработке и теоретическом обосновании ключевых положений работы, проведении численных и натурных экспериментов, обработке экспериментальных данных, синтезе и интерпретации полученных результатов, подготовке и публикации материалов диссертационной работы.

**Объем и структура диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка литературы и приложений. Объем диссертационной работы составляет 178 страниц машинописного текста, который включает 27 таблиц, 31 рисунок и 8 приложений. Список использованной литературы состоит из 151 наименования, включая 44 на иностранных языках.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** приведена общая характеристика работы: обоснована актуальность, сформулированы цель и задачи исследования, указаны научная новизна, определена теоретическая и практическая значимость, приведены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проанализирован текущий уровень благоустройства жилых помещений в городах РФ, сделан вывод о необходимости осуществления качественных изменений в сфере внутреннего благоустройства.

Проанализированы теоретические подходы к оценке удовлетворенности людей внутренним микроклиматом. Выявлено, что использование методики П.О. Фангера позволяет количественно оценить уровень комфорта, основанный на параметрах внутреннего микроклимата и индивидуальных характеристиках людей. Обнаружено, что централизованное теплоснабжение не адаптировано к индивидуальным потребностям жителей многоквартирных домов, особенно в переходные периоды.

Сделан вывод о необходимости разработки модели теплового режима здания, учитывающей количественную оценку уровня теплового комфорта.

**Во второй главе** предложена математическая модель, в основе которой лежит расчет тепломассообменных процессов здания, позволяющая определить тепловой режим здания и потребление тепловой энергии на нужды отопления, параметры микроклимата здания и произвести количественную оценку уровня теплового комфорта людей. Основу модели составляют уравнения балансов тепловых потоков на поверхностях ограждающих конструкций и в объемах помещения.

Математическая модель учитывает геометрические и теплотехнические свойства здания, наружную температуру, рассчитывая погодные условия для конкретного промежутка времени.

Для обработки данных погодных условий использовано разработанное в рамках исследования программное обеспечение (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2022682711). Расчет температуры наружного воздуха реализован с использованием базы данных погодных условий (доступна для г. Белгорода с временным интервалом, равным 3 часа). При помощи этих данных и аппроксимации полиномом получено уравнение, отражающее изменение температуры с течением времени.

Получение расчетных температур внутренней и внешней поверхности ограждающих конструкций достигнуто системой дифференциальных уравнений, решение которых найдено методом обратной прогонки.

Нахождение температурного поля наружного ограждения выполняется решением уравнения нестационарной одномерной теплопроводности:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right); \quad (1)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha (T_{\text{ср}} - T), \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность  $\text{кг/м}^3$ ;  $c$  – удельная теплоемкость,  $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $\tau$  – время, сек.;  $T$  – температура поверхности,  $^\circ\text{C}$ ;  $T_{\text{ср}}$  – температура среды, омывающей эту поверхность,  $^\circ\text{C}$ ;  $x$  – шаг сетки, м;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $\text{кВт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  $\text{кВт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ .

Решение дифференциального уравнения теплопроводности заключается в его дискретизации, т.е. замене на систему линейных уравнений в узлах пространственной сетки, созданной разбиением координат на конечное количество точек с определенным шагом. Вычисление температуры в узлах сетки осуществляется итеративно, используя значения предыдущих узлов, до достижения стабильного решения.

Дискретизация осуществляется методом конечных разностей. Этот метод основывается на замене дифференциала на приращения, рассчитываемые на основе разницы температур в соседних точках:

$$q = \lambda \frac{\Delta T}{\Delta x} = \lambda \frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta x}. \quad (3)$$

Для каждой пары соседних узлов сетки записывается дискретное уравнение, где величина  $q$  остается неизменной в соответствии с законом сохранения энергии. В результате получается система из  $n$  уравнений с  $n+2$  неизвестными:  $q$  и температурами в узлах сетки  $T_0, T_1, \dots, T_n$ :

$$q = \lambda \frac{T_1 - T_0}{\Delta x}; \quad q = \lambda \frac{T_2 - T_1}{\Delta x}; \quad \dots; \quad q = \lambda \frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta x}; \quad \dots; \quad q = \lambda \frac{T_n - T_{n-1}}{\Delta x}. \quad (4)$$

Получение дискретного аналога процесса осуществляется интегрированием дифференциального уравнения по временному и пространственным интервалам:

$$\rho c \int_a^b \int_{\tau_0}^{\tau} \frac{\Delta T}{\Delta \tau} d\tau dx = \rho c \int_{\tau_0}^{\tau} \int_a^b \frac{\Delta T}{\Delta \tau} dx d\tau. \quad (5)$$

Обозначив температуру в начальный момент времени индексом «0» как  $\tau_0$ , получаем:

$$\rho c \Delta x (T_i - T_i^0) = \int_{\tau_0}^{\tau} \left( \lambda_a \frac{T_{i+1} - T_i}{\Delta x} - \lambda_b \frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta x} \right) d\tau. \quad (6)$$

Метод решения дифференциального уравнения заключается в нахождении значений температуры  $T_i$  на следующий момент времени, исходя из известных значений температуры  $T_i^0$  на текущий момент времени. Величина шага по времени  $\Delta \tau$  выбирается таким образом, чтобы изменение температуры по времени было меньше, чем изменение температуры между соседними узлами сетки:

$$\Delta \tau < \rho c \frac{\Delta x^2}{2\lambda}. \quad (7)$$

Для решения дифференциального уравнения применяется схема Кранка-Николсона, которая использует итерационный подход к вычислениям. Расчет начинается с задания начального значения температуры  $T_i^0$ . Затем производится расчет  $T_i$ , используя  $T_i^0$ , полученное в предыдущей итерации. Расчет заканчивается, когда разница между полученными  $T_i$  и  $T_i^0$  становится незначительной.

При расчете многослойной ограждающей конструкции при переходе между слоями материалов с разными коэффициентами теплопроводности применяются приграничные контрольные объемы, которые имеют длину равную половине шага сетки ( $\Delta x/2$ ), что приводит к следующему дискретному аналогу:

$$\rho c \frac{\Delta x}{2 \Delta \tau} (2 \cdot (T_i - T_i^0)) = \frac{1}{2} \left( \lambda_b \frac{2 \cdot (T_{i+1} - T_i)}{\Delta x} - \lambda_a \frac{2 \cdot (T_i - T_{i-1})}{\Delta x} \right) + \frac{1}{2} \left( \lambda_b \frac{2 \cdot (T_{i+1}^0 - T_i^0)}{\Delta x} - \lambda_a \frac{2 \cdot (T_i^0 - T_{i-1}^0)}{\Delta x} \right) \quad (8)$$

Для нахождения решения этой системы линейных уравнений применяется метод прогонки. Область разбивается на узлы с номерами от 0 до  $n$ , а для левой и правой границ заданы граничные условия третьего рода. В этом случае число уравнений и неизвестных равно  $n+1$ , и система представляется в виде формулы:

$$\begin{cases} a_0 T_1 + b_0 T_0 + d_0 = 0 \\ \dots \\ a_i T_{i+1} + b_i T_i + c_i T_{i-1} + d_i = 0 \\ \dots \\ b_n T_n + c_n T_{n-1} + d_n = 0 \end{cases} \quad (9)$$

Выразим температуру  $T_0$  из первого уравнения:

$$T_0 = -\left(\frac{a_0}{b_0}\right) T_1 - \left(\frac{d_0}{b_0}\right) \quad \text{или} \quad T_0 = f_0 T_1 + g_0, \quad (10)$$

где  $f_0 = -\left(\frac{a_0}{b_0}\right)$ ;  $g_0 = -\left(\frac{d_0}{b_0}\right)$ .

Подставим  $T_0$  во второе уравнение, получаем:

$$a_1 T_2 + b_1 T_1 + c_1(f_0 T_1 + g_0) + d_1 = 0. \quad (11)$$

Выразим температуру  $T_1$  из этого уравнения, имеем:

$$T_1 = -\left(\frac{a_1}{b_1 + c_1 \cdot f_0}\right) T_2 - \left(\frac{d_1 + c_1 \cdot g_0}{b_1 + c_1 \cdot f_0}\right) = f_1 T_2 + g_1. \quad (12)$$

Проведем аналогичные преобразования и подстановки для следующих уравнений, получаем:

$$T_i = f_i T_{i+1} + g_i, \quad (13)$$

где  $f_i = -\left(\frac{a_i}{b_i + c_i \cdot f_{i-1}}\right)$ ,  $g_i = -\left(\frac{d_i + c_i \cdot g_{i-1}}{b_i + c_i \cdot f_{i-1}}\right)$ .

Таким образом производится расчет температуры в узле  $n$ , используя только значения коэффициентов  $f$  и  $g$  в предыдущих узлах, без необходимости нахождения значения температур в узлах. Для этого подставим выражение, полученное из предпоследнего уравнения ( $i = n - 1$ ):

$$T_{n-1} = f_{n-1} T_n + g_{n-1}, \quad (14)$$

в последнее уравнение с номером  $n$  и находим искомую температуру в узле  $n$ :

$$T_n = \left(\frac{d_n + c_n \cdot g_{n-1}}{b_n + c_n \cdot f_{n-1}}\right). \quad (15)$$

После того, как были определены коэффициенты  $f$  и  $g$  для всех узлов от 0 до  $n-1$  и значение  $T_n$ , можно рассчитать температуру в остальных узлах, производя расчет от последнего узла к начальному.

Расчет температуры внутреннего воздуха в следующий момент времени выполняется согласно зависимости:

$$t_{i+1} = \frac{c_{возд} \cdot V_{от} \cdot t_i - \Delta t \cdot (Q_{вент} + Q_{кр} + Q_{подв} + Q_{окн} + Q_{ст} - Q_{быт} - Q_{от})}{c_{возд} \cdot V_{от}}, \quad (16)$$

где  $t_{i+1}$  – температура внутри помещения в следующий момент времени, °С;

$c_{возд}$  – удельная теплоемкость воздуха,  $\frac{кДж}{м^3 \cdot К}$ ;  $V_{от}$  – отапливаемый объем здания,  $м^3$ ;

$t_i$  – температура внутри помещения в предыдущий момент времени, °С;  $\Delta t$  – шаг по времени, сек;  $Q_{вент}$  – потери теплоты через вентиляцию, кВт;  $Q_{кр}$  – потери теплоты через чердачное перекрытие, кВт;  $Q_{подв}$  – потери теплоты через подвальное помещение, кВт;  $Q_{окн}$  – потери теплоты через окна, кВт;  $Q_{ст}$  – потери теплоты через стены, кВт;  $Q_{быт}$  – поступления теплоты от тепловыделений, кВт;  $Q_{от}$  – поступления теплоты от системы теплоснабжения здания, кВт.

Полученная динамика изменения температуры внутреннего воздуха используется для расчета динамики изменения индексов теплового комфорта  $PMV$  (прогнозируемая средняя оценка) и  $PPD$  (прогнозируемый процент недовольных) согласно методике П.О. Фангера, закрепленной в ГОСТ Р ИСО 7730-2009.

Получена аналитическая зависимость усредненных удельных бытовых тепловых выделений от расчетной заселенности:

$$q_{\text{бт}} = 487,8 \cdot n^{-1,016} \quad (17)$$

Установлена зависимость начала периода потребности в тепловой энергии от класса энергетической эффективности зданий. Определены температуры внутреннего воздуха помещения при температуре наружного воздуха равной 8°C (значение температуры начала и окончания отопительного периода), а также температуры наружного воздуха, соответствующие началу периода потребности в тепловой энергии, при которых температура внутреннего воздуха при отсутствии отопления будет равна 20°C (рисунок 1).

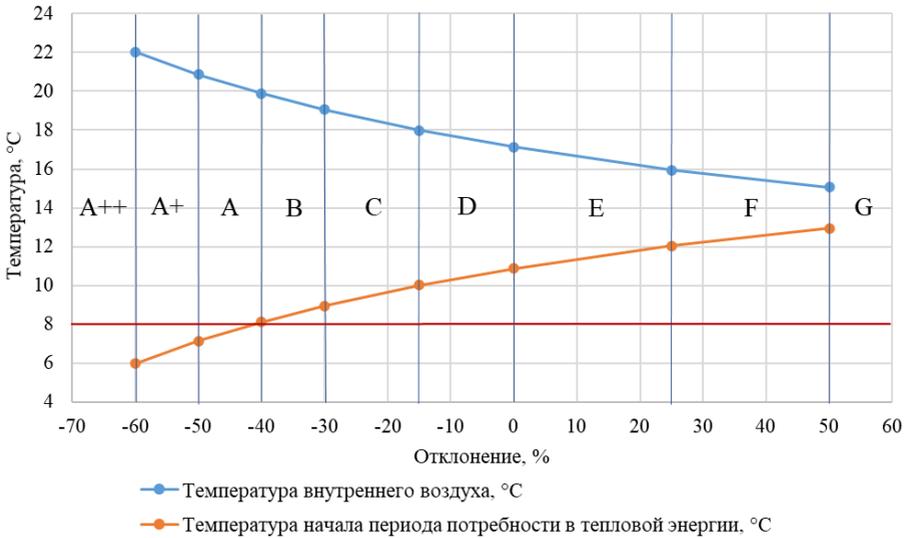


Рисунок 1 – Зависимость температуры внутреннего воздуха и значения температуры начала периода потребности в тепловой энергии от величины отклонения значения фактического удельного годового расхода энергетических ресурсов от базового уровня

**В третьей главе** рассматриваются результаты экспериментальных данных, результаты работы модели, подтверждение ее адекватности, проводится уточнение уровней метаболизма людей в возрасте 18-75+ лет, занятых разными категориями работ, и детей в возрасте 3-17 лет, занятых умственным или легким трудом, проведена оценка теплового комфорта с использованием уточненных данных.

Проанализированы результаты измерений температур в квартире после официального окончания отопительного периода (проводились 05.05.22 - 13.05.22 г. и 08.05.23 - 15.05.23 г.). Для проведения измерений применялся многоканальный измеритель АКТАКОМ АТЕ-2036, осуществляющий запись результатов с интервалом в одну минуту.

При температуре наружного воздуха, удовлетворяющей критериям для прекращения работы центрального отопления и температуре поверхности

внутренних стен, соответствующей установленным стандартам, внутренняя температура не находится в оптимальных (22-25°C) или допустимых (20-28°C) пределах для теплого времени года, как указано в ГОСТ 30494-2011, что указывает на проблемы с тепловым комфортом в помещении. Например, среднесуточная температура в помещении в период с 05.05 по 06.05.2022 составляла 18,36°C, а с 12.05 по 13.05.2022 – 19,71°C.

Сравнительный анализ с помощью критерия W-Вилкоксона показал, что эмпирические данные и данные, полученные с помощью модели, не имеют статистически значимых различий ( $W = -0.085$ ,  $p = 0,932$ ), что подтверждает эффективность и достоверность применяемой математической модели для прогнозирования температуры воздуха в помещении.

Таблица 1 – Значения *PMV* и *PPD* при различных уровнях метаболизма

Уровень метаболизма <i>M</i> , Вт/м <sup>2</sup>	<i>PMV</i>	<i>PPD</i> , %	$T_{\text{возд}}$ при <i>PMV</i> = 0
58 Сидя, расслабленно	-3,09 Холодно	99,46	26,1
70 Сидячая работа	-2,06 Прохладно	79,20	24,7
93 Легкая двигательная активность	-0,93 Немного прохладно	23,33	22,0
116 Средняя двигательная активность	-0,29 Нейтрально	6,79	19,4

Разработанная математическая модель позволяет получить динамику изменения индексов теплового комфорта *PMV* и *PPD* по времени. По среднесуточным температурам проведен расчет усредненного состояния теплового комфорта человека и температуры воздуха, при которых будет достигаться термодинамическое равновесие между телом человека и окружающей средой (таблица 1).

В результате анализа нормативных документов и справочно-методической литературы проведено уточнение уровней метаболизма человека, занятого различными видами труда (таблица 2).

Таблица 2 – Результаты расчета уровней метаболизма человека разных возрастов и категорий работ

категория работ по уровню энергозатрат	Уровень метаболизма, Вт/м <sup>2</sup>					средние по возрасту	средние по работе
	Возраст, лет						
	18 - 29	30 - 44	45 - 64	65 - 74	≥75		
Легкая, Ia	59,23	57,23	53,91	51,27	50,28	54,38	63,21
	78,79	75,78	71,16	67,81	66,67	72,04	
Легкая, Ib	79,85	76,84	72,24	68,91	67,23	73,01	81,90
	98,89	95,39	90,03	85,45	84,18	90,79	
Средней тяжести, IIa	99,95	96,45	90,57	86,55	84,75	91,65	106,17
	131,68	126,66	119,14	114,11	111,86	120,69	
Средней тяжести, IIб	132,73	127,72	120,22	114,66	112,43	121,55	135,63
	163,41	157,39	148,25	141,12	138,42	149,72	
Тяжелая, III	164,46	158,45	148,79	142,23	139,55	150,70	165,65
	197,25	189,72	178,44	170,34	167,23	180,60	

Таблица 3 – Уровень метаболизма детей при умственной и легкой видах работ

Возраст, лет	Уровень метаболизма, Вт/м <sup>2</sup>			
	Состояние покоя/умственная деятельность		Легкая работа	
	Девочки	Мальчики	Девочки	Мальчики
3	88,70	93,54	102,09	106,67
4	81,79	89,86	93,69	101,64
5	78,21	87,10	88,99	99,15
6	77,09	83,54	88,28	95,83
7	76,98	82,64	87,32	93,96
8	75,25	80,74	85,85	92,27
9	74,04	78,99	83,79	90,69
10	71,59	78,01	82,33	88,90
11	66,51	73,48	76,36	84,46
12	65,59	73,32	74,64	84,24
13	63,86	71,44	72,98	81,44
14	62,65	69,25	71,31	79,05
15	62,65	68,05	71,69	77,77
16	62,16	68,73	70,40	78,55
17	61,54	69,85	70,33	79,91

Используя антропометрические показатели детей (рост, пол, массу и возраст ребенка) согласно данным ВОЗ, уравнение Шофилда для расчета скорости метаболизма и формулу Дюбуа для расчета площади поверхности человеческого тела был рассчитан уровень метаболизма при умственной нагрузке (или состоянии покоя) и легкой работе (таблица 3).

В четвёртой главе описаны методика определения температуры начала периода потребности в тепловой энергии и методика определения потребности в теплоте с учетом адаптивных запросов жильцов, а также предлагаемые конструкции индивидуальных тепловых пунктов для запуска отопления при нарушении теплового комфорта до начала и после официального окончания отопительного сезона.

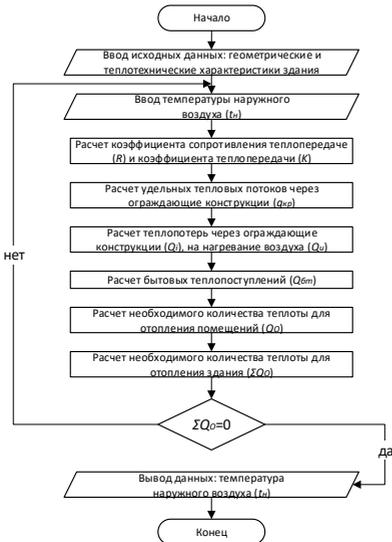


Рисунок 2 – Блок-схема методики определения температуры начала периода потребности в тепловой энергии здания

Разработана методика определения температуры начала периода потребности в тепловой энергии (рисунок 2). Методика позволяет произвести расчет температуры наружного воздуха, при которой необходимо начинать подачу тепловой энергии в здание, исходя из его теплотехнических и геометрических характеристик. Температура внутреннего воздуха принимается равной  $t_{в}=20^{\circ}\text{C}$ .

Определение температуры начала периода потребности в тепловой энергии выполняется циклом последовательных приближений. Изменяемым параметром приближения является температура наружного воздуха ( $t_n$ ), при которой  $\sum Q_о$  принимает значение, равное 0. При на-

личии отрицательных значений  $Q_0$  на отдельных этажах после серии последовательных приближений, предыдущий расчет выполняется повторно для самого минимального поэтажного значения  $Q_0$ .

Для расчета по методике рассмотрен 9-этажный многоквартирный дом серии 91-014 классов энергоэффективности от G (очень низкий) до A++ (высочайший) размером 76 x 11 м, высота этажа – 2,8 м. На рисунке 3 представлен результат расчета в виде графика отопительных нагрузок. Прямые соответствуют величинам отклонения значения фактического удельного годового расхода энергетических ресурсов от базового уровня, %. Точка пересечения графика с осью температур является температурой начала периода потребности в тепловой энергии для класса энергоэффективности здания.

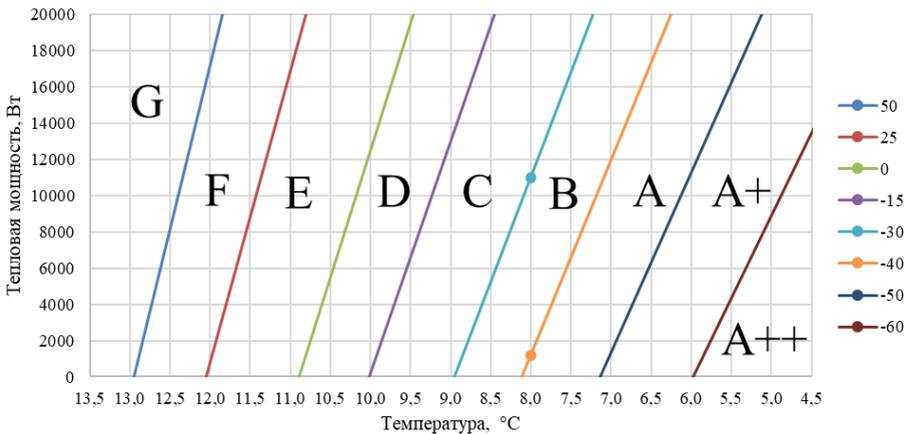


Рисунок 3 – График отопительных нагрузок зданий различных классов энергоэффективности

Методика определения потребности в теплоте с учетом адаптивных запросов жильцов позволяет рассчитать количество теплоты, необходимое для обеспечения термодинамического равновесия человеческого тела с окружающей средой (рисунок 4). В методике используются геометрические и теплотехнические характеристики здания, состав жильцов (количество, распределение по комнатам, возраст, пол), параметры микроклимата помещения (скорость воздуха, влажность), комплект домашней одежды жителей или уровень теплоизоляции комплекта. Уровень метаболизма детей принимается согласно таблице 3, других возрастов – таблице 2. Расчет выполняется циклом последовательных приближений.

Для расчета рекомендуется принимать «Состояние покоя/умственная деятельность» для детей и категорию работ «Легкая, Ia» для остальных групп. Если известно, что активность проживающих в помещении людей выше, необходимо выбрать из таблиц соответственно категории «Легкая работа» и «Легкая, Ib» или выше.



Результаты расчета для зданий разных классов энергоэффективности представлены на рисунке 6 (результаты приведены для классов F (низкий) и G (очень низкий), остальные приведены в диссертационной работе).

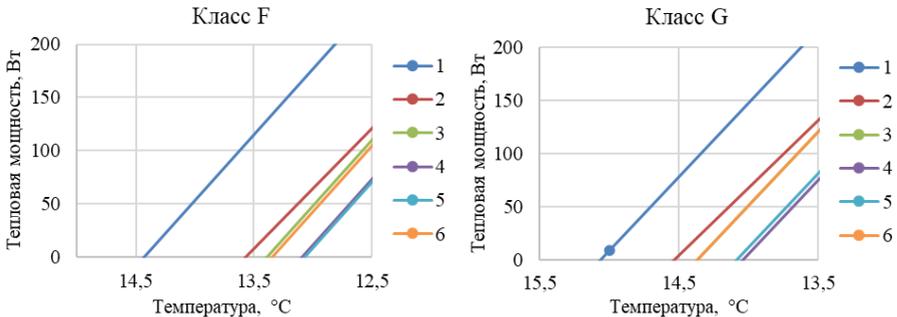


Рисунок 6 – Графики отопительных нагрузок классов F и G

Для двухтрубных систем теплоснабжения предлагается конструкция индивидуального теплового пункта при независимом присоединении местной системы отопления (СО), предусматривающим использование теплоты отработанной воды после подогревателей горячего водоснабжения (ГВС), предложенная Самариным О.Д.

В рамках диссертационного исследования разработана конструкция индивидуального теплового пункта четырёхтрубной системы теплоснабжения (рисунок 7).

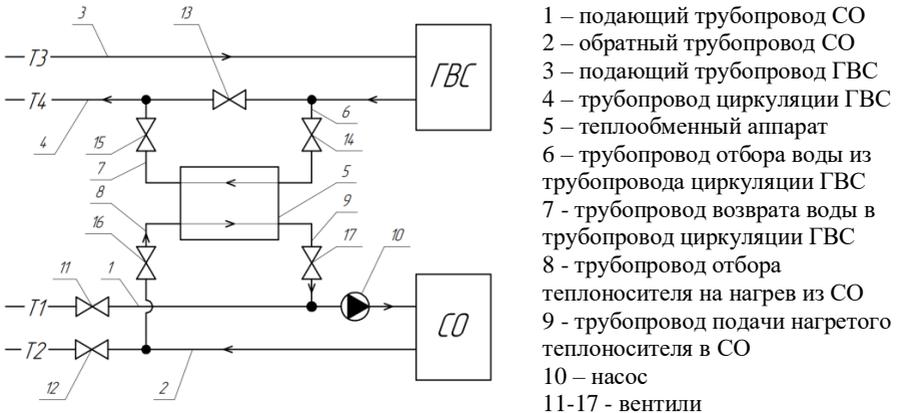


Рисунок 7 – Конструкция индивидуального теплового пункта четырёхтрубной системы теплоснабжения

Подача тепловой энергии до начала и после официального окончания отопительного сезона достигается тем, что конструкция дополнительно содержит теплообменный аппарат, к которому через трубопроводы подключается трубопровод циркуляции ГВС, обратный и подающий трубопровод СО, и дополнительно содержит насос, обеспечивающий подачу нагретого теплоносителя потребителю.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача по учету конструктивных особенностей эксплуатируемых зданий и адаптивных потребностей жильцов в переходные периоды года за счет разработки методик и конструкции индивидуального теплового пункта для подачи тепловой энергии на нужды отопления до начала и после официального окончания отопительного сезона.

### Итоги выполненного исследования

1. Выполнен совокупный анализ развития систем теплоснабжения в России, методов и технических средств их обеспечения, а также текущих режимов и методов автоматизации отопления, который подчеркивает важность интеграции современных технологий и адаптивных методов управления для обеспечения эффективного, экономичного и комфортного теплоснабжения. Это включает разработку гибких систем, учитывающих индивидуальные потребности и особенности зданий, для улучшения микроклимата и удовлетворения жителей, особенно в переходные периоды года. Данные ВЦИОМ за 2022-2023 гг. показывают неудовлетворенность ЖКУ в размере 36% опрошенных, анализ жилого фонда РФ по Росстату показал значения комплексных показателей уровня благоустроенности равными 71% - городского жилого фонда, 40% - сельского, 64% - всего жилого фонда. Показатели близки к насыщению, требуется качественное улучшение систем теплоснабжения с вниманием на адаптивность.

2. На основании дифференциального уравнения теплопроводности и методики оценки уровня теплового комфорта П.О. Фангера разработана математическая модель теплового режима здания и прогнозирования теплового комфорта жителей, учитывающая геометрию здания, его теплотехнические свойства, погодные условия. Решение дифференциального уравнения теплопроводности выполняется дискретизацией методом конечных разностей. В рамках работы над математической моделью разработано программно-алгоритмическое обеспечение для анализа параметров отопительного сезона по архиву климатических данных (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2022682711).

3. Для подтверждения разработанной модели проведены натурные измерения температурного режима. Критерий W-Вилкоксона равен  $-0,085$ , уровень значимости равен  $0,932$ , что подтверждает адекватность математической модели.

4. Разработана конструкция индивидуального теплового пункта четырехтрубной системы теплоснабжения, которая позволяет запускать отопление до начала и после официального окончания отопительного сезона при нарушении условий теплового комфорта в жилых зданиях. Результат достигается использованием теплоты воды, подаваемой на горячее водоснабжение, в часы минимального потребления. Предложена схема изменения индивидуальных тепловых пунктов для двухтрубных систем.

5. Установлена зависимость температуры начала периода потребности в тепловой энергии от класса энергоэффективности здания. Для здания класса энергоэффективности А температуре наружного воздуха  $8^{\circ}\text{C}$  соответствует

внутренняя температура воздуха 20°C. Для здания класса энергоэффективности D при наружной температуре 8°C внутренняя температура равна 17,99°C, что не соответствует оптимальным и допустимым значениям. Температура внутреннего воздуха 20°C достигается при температуре наружного воздуха, равной 10,01°C, что указывает на необходимость раннего начала отопительного сезона для этих зданий.

6. Разработана методика определения температуры начала периода потребности в тепловой энергии здания. Проведен расчет для 9-этажного дома разных классов энергоэффективности. Температура варьируется от 5,92°C до 14,35°C в зависимости от класса энергоэффективности здания. Экономия от использования тепловой энергии отопления по отношению к электрообогреву на многоквартирный дом составляет до 6383,31 р/сут (для класса G).

7. Разработана методика определения тепловой потребности здания с учетом адаптивных запросов жильцов. Проведен расчет на примере квартиры различных классов энергоэффективности с 6 различными вариантами заселения группами людей по комнатам. Различия нормативного и адаптивного расчета составляют от 3,57% до 13,71% в зависимости от класса энергоэффективности.

Теоретические и экспериментальные результаты диссертационной работы могут быть **рекомендованы** для использования органами местного самоуправления, управляющими компаниями, проектными организациями при разработке проектов систем отопления.

**Перспективы дальнейших исследований** направлены на уточнение значений уровней метаболизма людей по большему количеству признаков, разработку дополнительных конструкций индивидуальных тепловых пунктов с их экспериментальной проверкой на объектах, разработку вариантов интеграции результатов исследования с системами «умный дом».

## СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ, В КОТОРЫХ ИЗЛОЖЕНЫ ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАБОТЫ

*В журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК и индексируемых в базе данных Scopus*

1. Мерщев А.А. Моделирование нестационарного теплового режима помещения с деревянными ограждающими конструкциями / А.А. Мерщев, П.А. Головинский, **М.В. Свирин**, А.С. Семенов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова, 2022. – № 8. – С. 35-49.

2. **Свирин М.В.** Исследование влияния ненормативной внутренней температуры помещения на тепловой комфорт в переходный период с использованием индексов PMV и PPD / **М.В. Свирин** // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура, 2022. – №3(22). – С. 28-38.

3. Лобанов Д.В. Определение теплоступлений от человека с учетом энерготрат и физической активности / Д.В. Лобанов, И.И. Звенигородский, **М.В. Свирин**, С.А. Сафонов, А.С. Семенов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова, 2023. – № 1. – С. 42-52.

4. **Svirin M.V.** Analysis of the unsteady temperature condition of a building during non-working hours when heating load is decreased / **M.V. Svirin**, S.A. Bychikhin, P.A. Trubaev, A.S. Seminenko // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020. – Vol. 791. – P. 012047.

5. **Svirin M.V.** Dependence of the temperature of the beginning of the heating season on the energy efficiency class of the building / **M.V. Svirin**, D.M. Kosilov, A.S. Seminenko // Journal of Physics: Conference Series, 2021. – Vol. 1926(1). – P. 012070.

*В сборниках трудов конференций*

6. **Свирин М.В.** Анализ нестационарного теплового режима здания при снижении отопительной нагрузки в нерабочее время / **М.В. Свирин**, С.А. Бычихин // IV Международная научно-техническая конференция «Энергетические системы», 2019. – С. 424-432.

7. **Свирин М.В.** Проблема контроля качества тепловой энергии эксплуатируемых зданий / **М.В. Свирин**, А.С. Семенов // 10-я Международная молодежная научная конференция «Молодежь и XXI век – 2020», 2020. – С. 348-351.

8. **Свирин М.В.** Влияние удаленности потребителя тепловой энергии на внутреннее благоустройство эксплуатируемых зданий / **М.В. Свирин**, Р.А. Глазков, А.С. Семенов // Национальная конференция с международным участием «Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова», 2020. – С. 1268-1274.

9. **Свирин М.В.** Анализ динамики внутреннего благоустройства жилого фонда России / **М.В. Свирин**, А.С. Семенов // Национальная конференция с международным участием «Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова», 2020. – С. 1275-1286.

10. **Свирин М.В.** Микроклимат в помещениях в доотопительный период как фактор благоустройства / **М.В. Свирин**, А.С. Семенов // XII Международный молодежный форум «Образование. Наука. Производство», 2020. – С. 406-409.

11. **Свирин М.В.**, Семенов А.С. Современное состояние расчета внутренних тепловых поступлений жилых помещений / **М.В. Свирин**, А.С. Семенов // Национальная конференция с международным участием «Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова», 2021. – С. 980-983.

12. **Свирин М.В.** Определение функциональной зависимости удельных бытовых тепловыделений от расчетной заселенности помещения / **М.В. Свирин**, А.С. Семенов // Национальная конференция с международным участием «Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова», 2021. – С. 984-988.

13. **Свирин М.В.** Концепт решения проблемы теплового режима жилых помещений в осеннее межсезонье / **М.В. Свирин**, А.С. Семенов // IV Всероссийская молодежная научно-практическая конференция «ЭНЕРГОСТАРТ», 2021. – С. 415-1 – 415-5.

14. **Свирин М.В.** Методы сбора и анализа данных для контроля микроклимата системами интернета вещей / **М.В. Свирин** // XIV Международный молодежный форум «Образование. Наука. Производство», Белгород, 2022. – С. 49-53.

15. **Свирин М.В.** Прогнозирование теплового комфорта эксплуатируемых зданий с помощью показателей PMV и PPD / **М.В. Свирин** // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, Белгород, 2022. – С. 65-70.

*Объекты интеллектуальной собственности*

16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022682711. Программа для анализа параметров отопительного сезона по архиву климатических данных: Заявка № 2022682110 от 17.11.2022; Опубликовано 25.11.2022 / Шеремет Е.О., Семиненко А.С., **Свирин М.В.**; правообладатель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова». – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ

**СВИРИН МАКСИМ ВАЛЕРЬЕВИЧ**

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ПОТРЕБНОСТИ В ТЕПЛОВОЙ  
ЭНЕРГИИ НА ОТОПЛЕНИЕ ЖИЛЫХ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ЗДАНИЙ  
В ПЕРЕХОДНЫЙ ПЕРИОД ГОДА**

Специальность 2.1.3 – Теплоснабжение, вентиляция,  
кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

---

Подписано в печать 29.03.2024 г. Формат 60×84/16  
Усл. печ. л. 1,16 Тираж 120 экз. Заказ № 49

Отпечатано в Белгородском государственном технологическом университете  
им. В.Г. Шухова  
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46