

На правах рукописи



**Шепс Роман Александрович**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ  
НАРУЖНЫХ ОГРАЖДЕНИЙ ЗДАНИЙ НА ОСНОВЕ  
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ**

05.23.03 - Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха,  
газоснабжение и освещение

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Пенза - 2019

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

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент  
**Щукина Татьяна Васильевна**

Официальные оппоненты: **Бодров Михаил Валерьевич**,  
доктор технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный  
архитектурно-строительный университет»,  
профессор кафедры «Отопление и вентиляция»

**Рымаров Андрей Георгиевич**,  
кандидат технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский  
Московский государственный строительный  
университет», заведующий кафедрой  
«Теплогазоснабжение и вентиляция»

Ведущая организация ФГБОУ ВО «Белгородский государственный  
технологический университет им. В.Г. Шухова»

Защита состоится 11 октября 2019 г. в 13:30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.184.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства», по адресу: 440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28, корпус 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Пензенского государственного университета архитектуры и строительства и на сайте <http://dissovet.pguas.ru/>.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Бикунова Марина Викторовна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В соответствии с государственной программой Российской Федерации «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года» повышение энергоэффективности зданий и сооружений является одним из приоритетов развития народного хозяйства. Основная доля энергопотерь в сооружениях различного назначения приходится на потери теплоты через наружные ограждения зданий, поэтому повышение их энергетической эффективности является актуальной задачей в области строительства и ЖКХ.

Один из вариантов решения этой задачи - создание и исследование новых типов наружных ограждений. Инновационные тенденции в конструировании позволяют снизить потери теплоты за счет применения изоляционных материалов нового поколения путем частичной утилизации тепловых выбросов. Наряду с использованием вторичных энергоресурсов перспективным является использование поглощения солнечного излучения наружными ограждениями, с его последующим преобразованием для обогрева помещений. Такие схемы утилизации солнечной энергии успешно используются за рубежом, преимущественно в климатических зонах с мягким температурным режимом в холодный период года.

Несмотря на обозначенную территориальную приоритетность, системы пассивного солнечного отопления зданий могут успешно эксплуатироваться и в климатических условиях Российской Федерации при технико-экономическом обосновании с учетом региональных особенностей, и использовании технических решений, предотвращающих перегрев в теплый период года.

**Объект исследования** – энергоэффективные наружные ограждения зданий и сооружений, пассивно утилизирующие солнечную радиацию.

**Предмет исследования** – влияние солнечной радиации на процессы теплопередачи, теплопроводности и аккумуляирования теплоты в многослойных

наружных ограждениях; оценка тепловых режимов строительных конструкций, теплового баланса зданий при пассивной утилизации солнечной энергии.

### **Степень разработанности**

Диссертационное исследование базируется на фундаментальных законах теплофизики, современных теоретических и практических исследованиях, связанных с созданием энергоэффективных наружных ограждений для снижения потребления ресурсов зданиями различного назначения. Среди отечественных ученых широко известны работы В.Н. Богословского, В.Г. Гагарина, Ю.А. Табунщикова, В.И. Бодрова, Т.А. Дацюк, Е.Г. Малявиной, К.Ф. Фокина, А.Д. Самарина, А.У. Франчука, В.А. Турулова. Следует отметить также ряд современных российских ученых, которые исследуют перспективы развития альтернативной энергетики: Н.Д. Шишкин, О.Г. Лушников, Н.А. Соболенко, М.Г. Тягунов. Среди зарубежных авторов наиболее интересными, содержательными и часто цитируемыми являются работы Дж. Даффи и У. Бекмана, а также Дж. Твайделл, А. Уэйр, Б. Андерсон, С. Зоколей, Р. Суда.

Несмотря на значительное количество работ, посвященных вопросам строительной теплофизики, а также альтернативным источникам, в частности солнечной энергетике, в настоящее время отсутствуют достаточно проработанные теоретические модели и практические данные, необходимые для рационального конструирования активных наружных ограждений на основе поглощения и аккумулирования солнечного излучения в соответствии с ресурсообеспеченностью территорий Российской Федерации.

**Целью диссертационной работы является** разработка методов расчета и конструирования энергоэффективных наружных ограждений, снижающих потребление энергоресурсов при эксплуатации зданий.

### **Поставленная цель определяет следующие задачи исследования:**

1. Выполнить анализ существующих способов повышения поглощения солнечной энергии наружными ограждениями и методов расчета многослойных панелей при изменяющихся тепловых потоках.

2. Разработать математическую модель и провести численные исследования тепловых режимов наружных ограждений, в которых, в отличие от известных ранее, учитываются поглощающие и теплоаккумулирующие свойства строительных материалов при воздействии солнечного излучения.
3. Предложить конструктивное решение ограждения здания с теплоаккумулирующим слоем, обеспечивающее утилизацию солнечного излучения при требуемых параметрах тепловой защиты для различных климатических зон.
4. Выполнить экспериментальные исследования тепловых режимов нового энергоэффективного наружного ограждения.
5. Определить экономическую целесообразность строительства и эксплуатации зданий с применением энергоэффективных наружных ограждений.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

- предложена на основе комплекса теоретических и экспериментальных исследований математическая модель определения теплового потока через многослойное наружное ограждение в нестационарных условиях, обусловленных воздействием солнечной энергии на аккумулирующий материал;
- получены аналитические зависимости изменения температуры и теплового потока для энергоэффективных наружных ограждений по времени.
- выявлены закономерности влияния солнечного излучения на тепловой режим энергоэффективных наружных ограждений;
- получены оптимальные параметры энергоэффективных наружных ограждений, обеспечивающих поступление теплового потока в помещение.

**Теоретическая значимость работы** заключается в получении новых расчетных формул для определения температурных режимов и тепловых потоков при суточных изменениях актинометрических показателей, используемых в методике расчета солнечных фасадов. Полученные выражения позволяют рассчитывать энергоэффективные наружные ограждения с утилизацией солнечного излучения для снижения потребления зданиями традиционных ресурсов в отопительный период.

**Практическая значимость работы** заключается в разработке метода расчета и компьютерной программы, позволяющих производить численное моделирование тепловых процессов в многослойных наружных ограждениях. Разработано энергоэффективное наружное ограждение (патент № 2604119). На основе результатов численных и экспериментальных исследований предложено конструктивное решение солнечной стеновой панели для применения в I, II, III климатических зонах РФ. Определены зоны экономической целесообразности пассивной утилизации солнечной энергии для климатических условий РФ. Расчетный годовой экономический эффект от внедрения интегрированных в фасады солнечных стеновых панелей в Центрально-Черноземном регионе составляет 54 тыс. руб. на 100 м<sup>2</sup> в ценах 2018 года.

Результаты диссертационного исследования использованы при проектировании и строительстве административно-производственного здания в г. Воронеж.

«Программа расчета температуры в 4-х слойной конструкции с переменным тепловым потоком» зарегистрирована в объединенном фонде электронных ресурсов «Наука и образование».

**Достоверность** научных выводов, положений и рекомендаций подтверждается результатами практических исследований и математического моделирования, адекватность которых доказана основополагающей теорией теплопередачи и достаточно обширным объемом исходной информации.

**Методология и методы исследования** базируются на сочетании теоретического и экспериментального подходов, основанных на анализе исследований отечественных и зарубежных ученых в области строительной теплофизики и солнечной энергетики. На основе классической и прикладной теории теплопроводности и теплообмена выполнено математическое моделирование процессов в энергоэффективных наружных ограждениях. Для изучения процесса утилизации солнечного излучения проводились экспериментальные исследования в реальных условиях. При получении и обработке экспериментальных дан-

ных использовались методы обобщения, а также системного анализа теоретических и эмпирических результатов.

**На защиту выносятся:**

- Системный подход при оценке возможности пассивной утилизации солнечной энергии в различных климатических зонах РФ.
- Математическая модель тепловых режимов наружных ограждений, в которой учитываются поглощающие и теплоаккумулирующие свойства строительных материалов при воздействии солнечного излучения.
- Параметры энергоэффективных наружных ограждений, полученные на основе результатов математического моделирования их теплоаккумулирующей способности.
- Технические решения для проектирования ограждений с теплоаккумулирующим слоем, подвергаемом солнечному облучению.
- Результаты технико-экономической оценки энергоэффективности наружных ограждений, пассивно утилизирующих солнечное излучение.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы были рассмотрены и обсуждены на научно-практических конференциях профессорско-преподавательского состава ВГТУ (Воронежского ГАСУ) (Воронеж, 2013-2018г.г.); Scientific Review. Proceedings of the international scientific conference, Czech Republic, Karlovy Vary-Russia, Moscow, 29-30 May 2015. Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции: сборник докладов VI (НИУ МГСУ 25-27 ноября 2015 г.).

**Публикации.** По результатам выполненной диссертации опубликовано 22 научные работы, в том числе 10 статей из перечня рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК, и 4 статьи, индексируемых Scopus. Получен патент № 2604119 и свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2018612863.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, списка литературы (98 наименований), семи приложе-

ний. Работа представлена на 153 страницах, содержит 40 рисунков и 18 таблиц, 73 формулы.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, отражена научная новизна и практическая значимость результатов.

**В первой главе** представлен анализ инновационных конструктивных решений и актуализированных методов расчета наружных ограждений, допускающих наличие теплоаккумулирующего слоя. Рассмотрены актинометрические данные климатических зон в соответствии со строительными нормами и рекомендуемыми способами определения облученности горизонтальной и вертикальной поверхностей.

При выполнении различных расчетов часто требуется величина годового расхода тепловой энергии на отопление. Суммарные годовые затраты на отопление  $Q^y$  главным образом зависят от конструкции наружных ограждений зданий и определяются следующим образом:

$$Q^y = [Q - (Q_s + Q_{int})v\xi]\beta, \quad (1)$$

где  $Q^y$  – потери теплоты через наружные ограждающие конструкции, МДж;  $Q_s$  – теплопоступления от солнечного излучения через светопропускающие конструкции, МДж;  $Q_{int}$  – бытовые теплопоступления, МДж;  $\xi \leq 1$  – коэффициент эффективности автоматического регулирования подачи тепла системой отопления;  $v$  – коэффициент уменьшения теплопоступлений при организации тепловой защиты ограждающих конструкций;  $\beta$  – коэффициент, который учитывает избыточное потребление тепла системой.

Величина  $Q_s$  учитывает только то тепло, которое поступило в помещение через светопропускающие ограждения: окна, остекленные двери и пр. Соответственно, количество теплоты солнечного излучения, которое передано на сами ограждающие конструкции,  $Q_s$  не учитывает.



В системах пассивного солнечного отопления аккумулярование тепловой энергии обеспечивается наружными ограждениями. Наиболее применимыми для климатических условий РФ являются наружные стены с теплоаккумулирующим слоем под светопропускающим остеклением.

Величину накопления солнечной энергии, Вт/м<sup>2</sup>, в слое можно определить из выражения:

$$Q_{\text{дп}} = \pm \int_0^{0,5Z} q_{\text{п}} d\tau = \pm \vartheta_{\text{п}}^{\text{max}} b \sqrt{2} \omega^{-1} = \pm \vartheta_{\text{п}}^{\text{max}} \sqrt{\frac{\lambda(c_p)}{\pi z}} = \pm \vartheta_{\text{п}}^{\text{max}} b (\pi z)^{-0,5}, \quad (2)$$

где  $q_{\text{п}}$  – удельный тепловой поток;  $z$  – полный период колебаний;  $b$  – коэффициент тепловой активности вещества (массива), численно равный  $b = \sqrt{\lambda c_p}$ ;  $\omega$  – частота колебаний температурных волн равная  $\omega = 2\pi / z$ ;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $c_p$  – объемная теплоемкость массива.

Для того чтобы рассчитать влияние совокупного излучения (суммы прямого, отраженного и рассеянного) на вертикальные поверхности за отопительный период  $Q_j^{\text{ver}}$ , необходимо использовать следующую формулу:

$$Q_j^{\text{ver}} = \sum_{i=1}^m Q_i^{\text{ver}} = \sum_{i=1}^m (S_{ij}^{\text{ver}} + D_i^{\text{ver}} + R_i^{\text{ver}}), \quad (3)$$

$$Q_j^{\text{ver}} = \sum_{i=1}^m Q_i^{\text{ver}} = \sum_{i=1}^m (S_{ij}^{\text{ver}} + D_i^{\text{ver}} + R_i^{\text{ver}}) = \sum_{i=1}^m \frac{(S_i^{\text{hor}} k + D_i^{\text{hor}} + R_i^{\text{ver}})}{2} + \frac{Q_i^{\text{hor}} A_i^{\text{cal}}}{2000}, \quad (4)$$

где  $S_{ij}^{\text{ver}}$  – прямое излучение солнца на вертикальную поверхность в  $i$ -м месяце отопительного периода для  $j$ -й ориентации, МДж/м<sup>2</sup>;  $D_i^{\text{ver}}$ ,  $R_i^{\text{ver}}$  – рассеянное и отраженное излучение солнца на вертикальную поверхность в  $i$ -м месяце отопительного периода, МДж/м<sup>2</sup>;  $S_i^{\text{hor}}$ ,  $D_i^{\text{hor}}$ ,  $R_i^{\text{ver}}$  – прямое, рассеянное и отраженное излучение солнца на горизонтальную поверхность в  $i$ -м месяце отопительного периода, МДж/м<sup>2</sup>;  $A_i^{\text{cal}}$  – альbedo поверхности в  $i$ -м месяце отопительного периода, %;  $k$  – коэффициент пересчета прямого солнечного излучения с горизонтальной поверхности на вертикальную  $i$ -го месяца отопительного периода для  $j$ -й ориентации. Все данные по солнечному излучению следует брать при действительных условиях облачности.

При проектировании необходимо не только рассчитать количество поступающей солнечной радиации, но и учесть особенности конструкции ограждений, а также материал исполнения, в совокупности способствующих поглощению излучения. Во многих случаях экономически целесообразным является использование теплоаккумулирующих материалов, т.к. такой подход при проектировании может значительно снизить теплопотери, удешевив тем самым эксплуатацию здания.

В настоящее время существует несколько методик расчета энергоэффективных ограждений. Одна из них – разработанный во Франции «Method 5000». Второй общеизвестный метод соотношения солнечного излучения и нагрузки в иностранной литературе известен как SLR. Последний, разработанный для систем прямого нагрева, метод неиспользуемости с некоторыми изменениями также применяется для расчета пассивных стен.

Данные методики базируются на определении величины собранной тепловой энергии, расчете теплопотерь, составлении баланса между теплопоступлениями и теплоизбытками, но они не позволяют оценить технические возможности солнечных стеновых панелей для выбора требуемых параметров под конкретные климатические условия. Кроме того, проведенный анализ позволил выявить не востребуемые ресурсы для технического совершенствования энергоэффективности наружных ограждений, утилизирующих солнечную радиацию, и необходимость исследований технических характеристик систем для оптимального конструирования.

**Во второй главе** рассматривается математическое моделирование тепловых процессов в энергоэффективных многослойных ограждающих конструкциях с учетом аккумулирующей способности.

Одномерное распространение теплоты в плоском слое теплопроводящей среды описывается уравнением теплопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\rho} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (5)$$

где  $\lambda$  – теплопроводность среды, Вт/(м°C);  $c$  – удельная теплоемкость, Дж/(кг°C);  $\rho$  – объемная плотность, кг/м<sup>3</sup>.

Для уравнения (5) на стыке слоев ( $x = 0$ ) выполняется условие теплового контакта, т.е. равенства температур и равенства тепловых потоков

$$T|_{x=-0} = T|_{x=+0}, \quad (6)$$

$$\lambda_1 \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=-0} + K(T_{\text{ext}}(t) - T(-0, t)) = \lambda_2 \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=+0} + q(t), \quad (7)$$

где учтено, что на границе материалов внутри наружного ограждения поглощается дополнительный тепловой поток с плотностью  $q(t)$ , вызванный солнечным излучением. В формуле (7)  $K$  – коэффициент теплообмена лучистой энергией;  $T_{\text{ext}}(t)$  – температура окружающей среды.

Теплообмен на поверхности ограждения учитывается с помощью граничного условия

$$\alpha(T_{\text{ext}}(t) - T(-0, t)) = \lambda_2 \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=-0}. \quad (8)$$

Здесь  $T_{\text{ext}}(t)$  может быть температурой наружного воздуха для внешней границы конструкции или постоянной температурой внутри помещения  $T_0$ .

Следствием линейности уравнения теплопроводности и линейных граничных условий является принцип суперпозиции температурных возмущений. Он позволяет представить исходную задачу в виде совокупности двух более простых задач. Первая задача является стационарной и учитывает все стационарные составляющие в граничных условиях. Вторая задача является квазистационарной и описывает установившиеся колебательные режимы с учетом периодически меняющейся со временем температуры наружного воздуха  $T_{\text{ext}}(t) = T_{\text{ext}} + \Delta T \cos(\omega t)$  и потока излучения, поглощаемого внутри конструкции на границе раздела сред  $q(t) = q_0(1 + \cos(\omega t))$ . Квазистационарный режим в слое толщиной  $l$  устанавливается спустя некоторое время  $t$ , определяемое ко-

эффицентом Фурье  $Fo = \lambda t / (c\rho l^2) \sim 1$ , за которое начальное температурное распределение переходит в стационарное.

Стационарная часть расчета с учетом перепада температур внутри и снаружи панели и постоянного потока теплоты на внутренней границе слоев решается с учетом кусочной линейности решений. Полное решение ищется в виде совокупности линейных функций  $T_k = a_k x + b_k$ . Подставляя эти решения в граничные условия, получаем систему линейных уравнений для определения постоянных коэффициентов  $a_k, b_k$ . Принимая за начало отсчета температуру внутри помещения, произведя формальную замену  $T \rightarrow T + T_0$ , получаем систему уравнений

$$\alpha_0 a_1 = \lambda_1 b_1, \lambda_1 b_1 = \lambda_2 b_2 + j_0, \quad (9)$$

$$a_1 + b_1 x_1 = a_2 + b_2 x_2, \alpha_{\text{ext}} (T_{\text{ext}} - a_2 - b_2 x_2) = \lambda_2 b_2.$$

Решением стационарной задачи являются выражения

$$\beta_1 = \frac{T_{\text{ext}} + j_0 / \alpha_{\text{ext}}}{1 / \alpha_{\text{ext}} + 1 / \alpha_0 + x_1 / \lambda_1}, \quad (10)$$

$$a_1 = \beta_1 / \alpha_0 = \frac{T_{\text{ext}} + j_0 / \alpha_{\text{ext}}}{\alpha_0 / \alpha_{\text{ext}} + \alpha_0 x_1 / \lambda_1 + 1}. \quad (11)$$

$$\beta_2 = \beta_1 - j_0 = \frac{T_{\text{ext}} - j_0 (1 / \alpha_0 + x_1 / \lambda_1)}{1 / \alpha_{\text{ext}} + 1 / \alpha_0 + x_1 / \lambda_1}. \quad (12)$$

$$a_2 = a_1 + \beta_1 x_1 / \lambda_1 - \beta_2 x_2 / \lambda_2. \quad (13)$$

Для решения нестационарной части задачи используется комплексная функция следующего вида

$$T(x, t) = u(x) e^{i\omega t}, \quad (14)$$

где  $u(x)$  – пространственная часть тепловой волны;  $\omega$  – частота теплового возмущения. Для удобства описания температурных волн введем коэффициент

затухания  $\beta = \sqrt{\frac{\omega c \rho}{2\lambda}}$ . Пространственная часть решения в каждой области

$k = 1, 2, K$  имеет вид

$$u_k(x) = A_k \exp(-\gamma_k x) + B_k \exp(\gamma_k x), \quad (15)$$

где  $\gamma_k = \beta_k + i\beta_k$ . После подстановки граничных условий возникает линейная система уравнений, которая решается численно. В окончательном решении нужно перейти к действительной форме, взяв действительную часть полученной зависимости.

Для одного слоя граничные условия позволяют получить четыре линейных уравнения для определения четырех неизвестных постоянных  $A_1, B_1, A_2, B_2$ :

$$\alpha_1(A_1 + B_1) = \lambda_1(-\gamma_1 A_1 + \gamma_1 B_1), \quad (16)$$

$$A_1 \exp(-\gamma_1 x_1) + B_1 \exp(\gamma_1 x_1) = A_2 \exp(-\gamma_2 x_1) + B_2 \exp(\gamma_2 x_1),$$

$$\lambda_1(-\gamma_1 A_1 \exp(-\gamma_1 x_1) + \gamma_1 B_1 \exp(\gamma_1 x_1)) = \lambda_2(-\gamma_2 A_2 \exp(-\gamma_2 x_1) + \gamma_2 B_2 \exp(\gamma_2 x_1))$$

$$\alpha_2(A_2 \exp(-\gamma_2 x_2) + B_2 \exp(\gamma_2 x_2) - 1) = \lambda_2(-\gamma_2 A_2 \exp(-\gamma_2 x_2) + \gamma_2 B_2 \exp(\gamma_2 x_2)).$$

Окончательное решение

$$T_1(x, t) = a_1 \exp(-\beta_1 x) \cos(\omega t - \beta_1 x + \varphi_{1-}) + b_1 \exp(\beta_1 x) \cos(\omega t + \beta_1 x + \varphi_{1+}), \quad (17)$$

$$T_2(x, t) = a_2 \exp(-\beta_2 x) \cos(\omega t - \beta_2 x + \varphi_{2-}) + b_2 \exp(\beta_2 x) \cos(\omega t + \beta_2 x + \varphi_{2+}). \quad (18)$$

Комплексные константы представляются в виде

$$A = \frac{-\alpha \theta(-\alpha + \lambda \gamma)}{(-\alpha + \lambda \gamma)^2 \exp(-\gamma) + (\alpha + \lambda \gamma)^2 (\exp(\gamma))}, \quad (19)$$

$$B = \frac{\alpha \theta(\alpha + \lambda \gamma)}{(-\alpha + \lambda \gamma)^2 \exp(-\gamma) + (\alpha + \lambda \gamma)^2 (\exp(\gamma))}. \quad (20)$$

Здесь  $A_1 = a_1 e^{i\varphi_{1-}}$ ,  $a_1 = |A_1|$ ;  $B_1 = b_1 e^{i\varphi_{1+}}$ ,  $b_1 = |B_1|$ ,  $A_2 = a_2 e^{i\varphi_{2-}}$ ,  $a_2 = |A_2|$ ,

$B_2 = b_2 e^{i\varphi_{2+}}$ ,  $b_2 = |B_2|$ .

Метод наложения температурных полей, основанный на фундаментальном свойстве линейности уравнения теплопроводности, позволяет найти общее

температурное поле как сумму тепловых полей, рассчитанных отдельно для стационарной и нестационарной задачи. Он применим для произвольного количества слоев, что позволяет рассчитывать тепловые режимы многослойных систем и выбирать для них оптимальные параметры.

По результатам исследований разработана прикладная компьютерная программа, моделирующая процесс нестационарной теплопроводности многослойного наружного ограждения. Программный комплекс обеспечивает наглядную демонстрацию распределения температуры в четырехслойной панели при переменной температуре наружного воздуха и тепловом потоке. Программа учитывает климатологию, а также требуемые условия к тепловой защите зданий.

**В третьей главе** приводится описание и результаты экспериментальных исследований наружного ограждения.

Для проверки основных положений математического моделирования и полученных зависимостей была смонтирована модель здания размером 2,5х2,5х3 метра. Модель здания выполнена из СИП панели толщиной 174 мм и состоит из 2-х малых помещений: основного и тамбура (рисунок 1). Для поддержания температуры внутреннего воздуха предусмотрена система электрического отопления с возможностью регулирования и поддержания температуры в интервале 18-22 °С. Модель здания отвечает необходимым требованиям по тепловой защите для климатических параметров г. Воронежа. Для определения плотностей тепловых потоков ограждающих конструкций был использован измерительный комплекс ИТП МГ 4.03/х (Ш) «Поток» (рисунок 2).

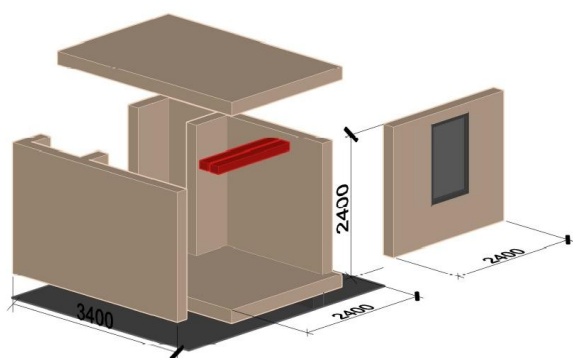


Рисунок 1 – Схема экспериментальной модели здания

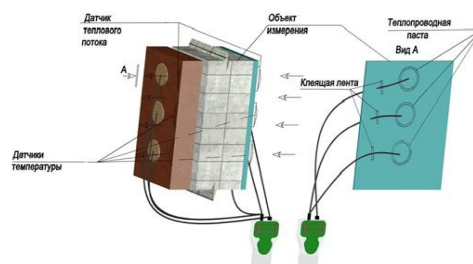


Рисунок 2 – Принципиальная схема проведения исследования согласно ГОСТ 25380-2014 «Здания и сооружения»

Для проведения исследований фасад содержал стеклопакет, за которым размещалась многослойная конструкция с аккумулялирующим материалом.

Исследования производились в течение отопительного периода, начиная с 5 декабря 2016 г. по 29 апреля 2017 г. Полученные результаты (таблица 1) отображены графически на рисунке 3 и показывают хорошее согласие экспериментальных данных с численным моделированием.

Таблица 1 – Определение значений по серии измерений прибором ИТП-МГ 4.03 «Поток» в январе 2017 г.

Показатели	$q_1, \text{Вт/м}^2$	$q_2, \text{Вт/м}^2$	$q_3, \text{Вт/м}^2$	$q_{\text{ср}}, \text{Вт/м}^2$	$t_{\text{нар.}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{вн.}}, ^\circ\text{C}$
Фактические	32.5	34.5	35.5	34.16	-12.35	19.45
По мат. модели	34	35.5	36	35,16	-12.35	19.45

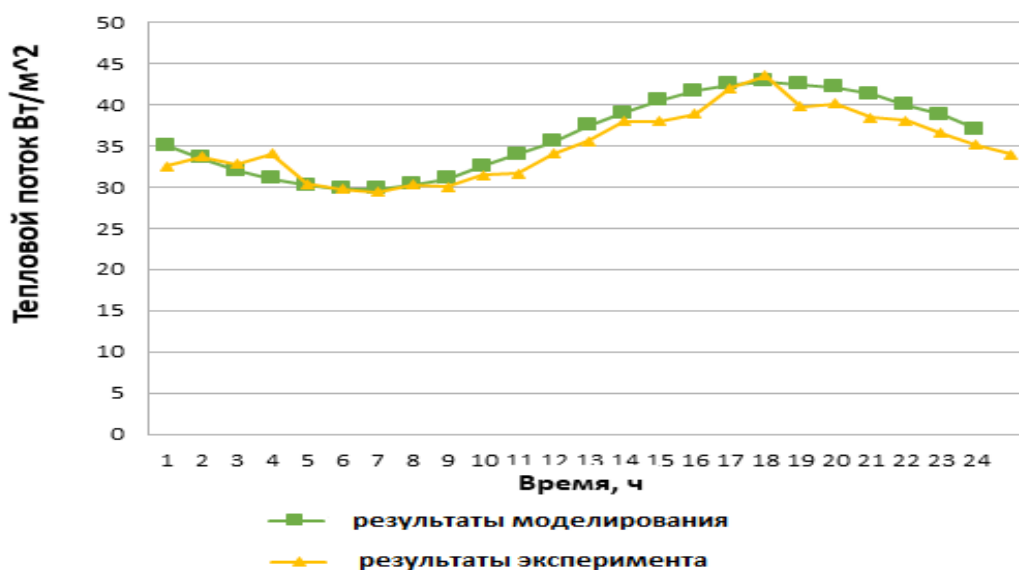


Рисунок 3 – Результаты численного моделирования и экспериментальные данные за 19 января 2017 г

Для адекватности результатов в других климатических зонах РФ проведено исследование нестационарного теплового потока в многослойной солнечной панели при помощи прикладной программы Temper 3D-6 (рисунки 4, 5). Данное программное обеспечение предназначено для вычисления полей температур наружных ограждений методом конечных элементов. В качестве конечного элемента используется восьмиузловой изопараметрический конечный элемент

с трилинейным распределением температуры. Максимально возможное количество узлов конечно-элементной сети - 8 млн.

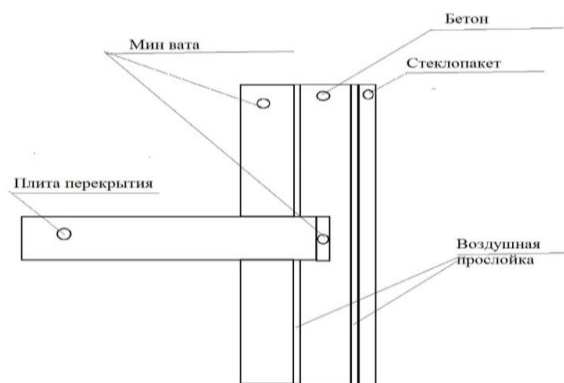


Рисунок 4– Разрез модели для Temper 3D-6

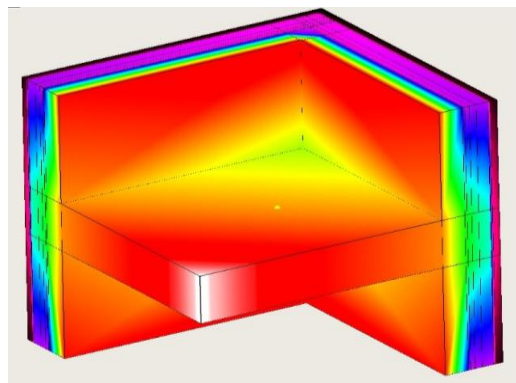


Рисунок 5 – Цветовое отображение теплового поля в модели ограждения по расчетам в Temper 3D-6

Параметры наружного воздуха для компьютерной программы задавались для г. Воронежа, г. Сочи и г. Архангельска. Результаты расчетов наружных ограждений представлены на рисунке 7 и аппроксимированы зависимостью:

$$T = a_1x^3 - a_2x^2 + a_3x - a_4, \quad (21)$$

где  $a_1, a_4$  – коэффициенты, учитывающие климатические характеристики региона, которые приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Значения коэффициентов  $a_1, a_4$  для рассмотренных городов

Район строительства	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$
Сочи	0,0085	0,3866	6,0501	13,306
Воронеж	0,0078	0,4702	8,7785	34,015
Архангельск	0,016	0,7239	11,563	47,342

Полученные результаты показывают (рисунок 6), что участки промерзания отсутствуют и предложенное решение целесообразно использовать при строительстве в других климатических зонах.



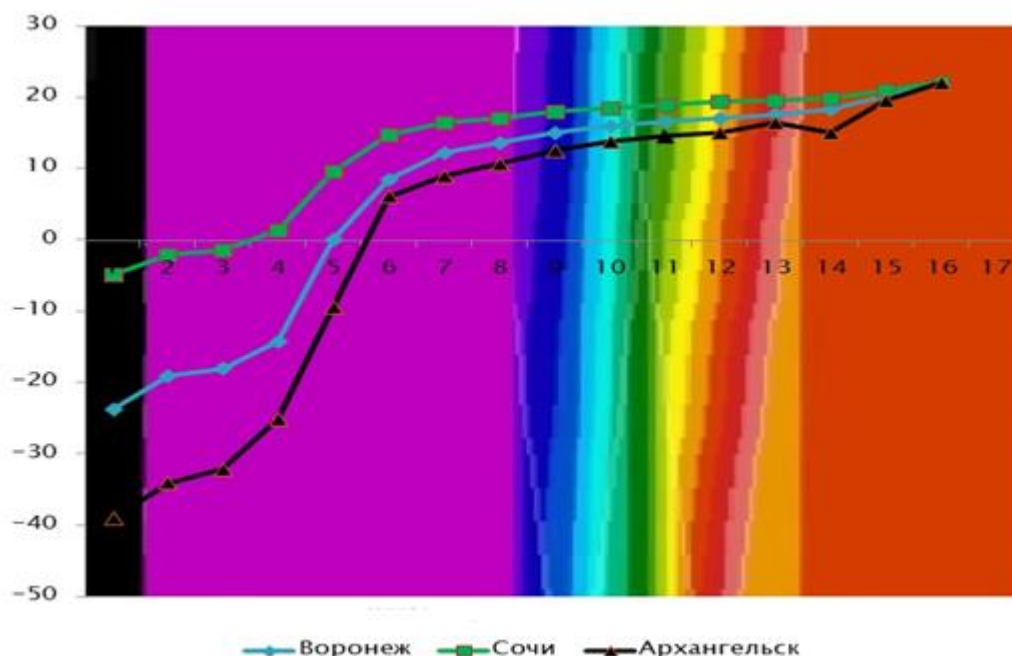


Рисунок 6 – Результат моделирования распределения температур в энергоэффективном ограждении толщиной 0,45 м с использованием программы Temper 6

На основании математической модели, достоверность которой была подтверждена экспериментальными исследованиями, разработан интегрированный солнечный тепловой коллектор (патент №2604119), представляющий стеновую панель со светопрозрачным покрытием (рисунок 7). При достаточной энергооблученности радиация проходит через остекление, попадая на светопрозрачные параболические отражатели 4. Последние способствуют частичному фокусированию излучения на жидкостных линзах 7, в которых предварительно нагревается теплоноситель. После жидкостных линз теплоноситель поступает в трубы 3, где дополнительно подогревается за счет поглощения излучения пластинами 2 и аккумулялирующим материалом. В теплый период года наружное ограждение охлаждается циркулирующим теплоносителем, который может быть использован на нужды горячего водоснабжения. В холодный период года утилизируемая солнечная энергия аккумулируется в стеновой панели и за счет циркуляции воздушной среды передается в отапливаемое помещение.

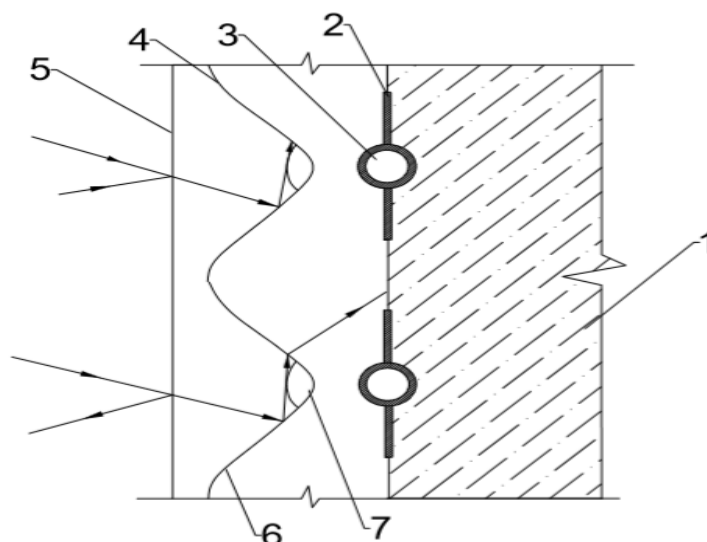


Рисунок 7 – Разрез энергоэффективного наружного ограждения:  
 1 – стеновая панель; 2 – поглощающие пластины; 3 – труба; 4 – параболические отражатели; 5 – светопрозрачное покрытие; 6 – светопропускающая гофрированная конструкция; 7 – жидкостная линза

**В четвертой главе** приведено технико-экономическое обоснование эффективности наружных ограждений на примере административно-производственного здания в г. Воронеж, что подтверждается актом о внедрении. Определена сметная стоимость затрат и строительно-монтажных работ. Проведен сравнительный анализ экономической эффективности разработанного ограждения во время эксплуатации с современными наиболее распространенными вариантами ограждающих конструкций. Проведена оценка величины годовой экономии в денежном и натуральном эквиваленте. Получены коэффициенты пересчета предложенного энергоэффективного решения для регионов РФ (таблица 3).

Таблица 3 – Экономия затрат тепловой энергии на отопление при применении энергоэффективных панелей по сравнению с типовыми конструкциями

Регион	Сокращение теплотеря за отопительный год, кВтч/100 м <sup>2</sup>	Экономия за отопительный период, руб.	Экономия за отопительный период, Гкал.
Воронеж	369,82	53794	26
Краснодар	218,99	31854,72	15
Сочи	105,83	15394,47	7,5
Архангельск	428,45	62322,29	30,5

## Окончание таблицы 3

Регион	Сокращение теплопотерь за отопительный год, кВтч/100 м <sup>2</sup>	Экономия за отопительный период, руб.	Экономия за отопительный период, Гкал.
Екатеринбург	513,57	74704,27	36
Новосибирск	447,87	65146,77	32
Владивосток	413,09	60088,18	29

Проведенные расчеты показывают, что годовая экономия тепловой энергии при применении предложенных решений находится в интервале от 7 до 36 Гкал в зависимости от региона строительства на 100 м<sup>2</sup> наружной энергоэффективной панели. Достижимая экономия на установке отопительных приборов составляет 48 тыс. руб. на 100 м<sup>2</sup> наружной площади несущей стены. Для базового региона - г. Воронеж - экономия затрат на оплату отопления в течение всего отопительного сезона за счет сокращения теплопотерь составляет 54 тысячи рублей.

На стадии технического содержания и эксплуатационных затрат происходит экономия финансовых средств на ремонт системы отопления и замену фасада в размере 258 тыс. руб. (ремонт осуществляется через 20 лет после начала эксплуатации). Установлено, что срок окупаемости энергоэффективного наружного ограждения по сравнению с монолитным строительством составляет 7 лет 9 месяцев.

Применение энергоэффективных строительных конструкций, способных аккумулировать солнечную энергию, позволило достичь экономию в размере 653 тыс. рублей в ценах 2018 года на обогрев здания в течение отопительного периода, исходя из того, что площадь энергоэффективной ограждающей конструкции составляет 1210 м<sup>2</sup>.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе анализа ресурсов солнечного излучения, а также существующих способов и конструкций его пассивной утилизации установлено, что для

климатических условий РФ использование энергоэффективных наружных ограждений позволяет повысить энергоэффективность зданий и сооружений.

2. Конструирование энергоэффективных наружных стен предполагает расположение несущего аккумулирующего слоя с внешней стороны под светопрозрачным ограждением и его защиту от перегрева в теплый период года посредством подвижных жалюзи или размещения на поглощающей поверхности развитой схемы трубопроводов для горячего водоснабжения. Последнее техническое решение позволяет отказаться в летний сезон от потребления традиционной тепловой энергии на горячее водоснабжение.
3. На основе выполненных теоретических исследований получены зависимости температурных режимов и тепловых потоков в энергоэффективных многослойных ограждениях, учитывающие суточные изменения солнечной радиации.
4. Предложен алгоритм и программа расчета, позволяющая численно рассчитать значения потоков, поступающих в помещение от энергоэффективных стеновой панели в зависимости от интенсивности солнечного излучения, температуры наружного воздуха и времени суток.
5. Результаты математического моделирования выявили рекомендуемую к проектированию толщину поглощающего и аккумулирующего слоя, которая в зависимости от широты местности и климатической зоны находится в интервале от 80 до 130 мм.
6. Экспериментальные исследования тепловых режимов интегрированной в фасад энергоэффективной панели показали, что при солнечной погоде и низких отрицательных температурах наружного воздуха фиксируется постоянное поступление тепла в помещение, количественно изменяющееся в течение суток.
7. Инерционность аккумулирующего слоя энергоэффективных наружных ограждений приводит к достижению максимальных поступлений в помещение

утилизированной теплоты в период с 17 до 19 часов, а минимальных с 5 до 7 часов.

8. Применение энергоэффективных наружных ограждений в климатических условиях РФ позволяет сократить потребление тепловой энергии в интервале от 7 Гкал до 36 Гкал на 100 м<sup>2</sup> поверхности энергоэффективного ограждения в зависимости от региона строительства.
9. Для спроектированного и построенного здания в г. Воронеж применение энергоэффективных наружных ограждений, способных аккумулировать солнечную энергию, позволило достичь экономии в размере 653 тыс. рублей в ценах 2018 года на обогрев здания в течение отопительного периода.

**Публикации.** Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

#### **Статьи в изданиях, входящих в Перечень ВАК**

1. **Шепс Р.А.** Теплозащитные свойства ограждений с учетом прогнозируемых условий эксплуатации / Т. В. Щукина, Р. А. Шепс // Жилищное строительство. – 2015. – № 7. – С. 29-30.
2. **Шепс Р.А.** Энергосберегающие каркасно-панельные малоэтажные здания / С. А. Колодяжный, Р. А. Шепс, Т. В. Щукина // Сантехника, отопление, кондиционирование. –2015. –№ 11. – С. 50-52.
3. **Шепс Р.А.** Влияние условий эксплуатации на изменение теплозащитных свойств ограждений / Т.В. Щукина, А.В. Гарманова, Р.А. Шепс // Сантехника, отопление, кондиционирование. –2015. –№ 2 (158). –С. 44-47.
4. **Шепс Р.А.** Перспективы и последствия СИП технологий для малоэтажного строительства / С. А. Колодяжный, Т. В. Щукина, Р.А. Шепс// Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2016. –№ 5 (365). – С. 215-219.
5. **Шепс Р.А.** Регулируемый тепловой режим пассивной утилизации солнечного излучения для снижения нагрузок на системы отопления / Т. В. Щукина, Р. А. Шепс, М.Н. Жерлыкина // Сантехника, отопление, кондиционирова-

ние. –2016. – № 11 (179). –С. 55-59.

6. **Шепс Р.А.** Учет солнечной энергии при проектировании тепловой защиты зданий / С. А. Яременко, Р. А. Шепс // Жилищное строительство. – 2017. – № 1-2. –С. 29-32.

7. **Шепс Р.А.** Влияние запыленности ограждающих конструкций на способность поглощать солнечную энергию / Р. А. Шепс, Л. А. Куцев, А. В. Шашин, Д. В. Лобанов // Приволжский научный журнал. – 2017. – № 4 (44). – С. 51-59.

8. **Шепс Р.А.** Тепловые потоки в пассивной многослойной солнечной панели / Р. А. Шепс, П. А. Головинский, Т. В. Щукина, С. А. Яременко // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2018. – № 7-9. –С. 55-62.

9. **Шепс Р.А.** Экономическая эффективность применения ограждающих конструкций с теплоаккумулирующей способностью / А. В. Воротынцева, В. А. Болгов, Р. А. Шепс, Т. В. Щукина // Экономика и предпринимательство. – 2018. – № 7 (96). –С. 1236-1240.

10. **Шепс Р.А.** Использование солнечного излучения при применении энергоэффективных ограждающих конструкций / Р. А. Шепс, Н. В. Портнова, Т. В. Щукина, И. И. Переславцева // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2018. – Т. 14. – № 3. – 46-51.

#### **Статьи в других изданиях**

11. **Шепс Р.А.** Влияние воздухопроницаемости на температурный режим строительных конструкций при эффективной эксплуатации зданий / Т. В. Щукина, Р. А. Шепс// Международный Научный Институт "Educatio". Ежемесячный научный журнал. – 2014. – № 3. – С. 119-121.

12. **Шепс Р.А.** Технология использования солнечного излучения посредством энергоэффективных ограждающих конструкций / Т. В. Щукина, Р. А. Шепс // Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции: сборник докладов VI (НИУ МГСУ 25-27 ноября 2015 г.). С. 329-333.

13. **Шепс Р.А.** Теплозащитные свойства ограждений с учетом прогнозируемых условий эксплуатации / Р. А. Шепс// Scientific Review. Proceedings of the international scientific conference, Czech Republic, Karlovy Vary-Russia, Moscow, 29-30 May 2015. – P. 95-100.

14. **Шепс Р.А.** Prospects and implications of structural insulated panels in low-rise construction / Т. В. Щукина, Р.А. Шепс// Journal "Scientific Israel- Technological Advantages" 2016. – Vol.18. – № 2.– P. 136-144.

15. **Шепс Р.А.** Снижение энергопотребления объектами ЖКХ посредством реконструкции светопрозрачных конструкций / Т. В. Щукина, Р.А. Шепс // Инженерные системы и сооружения. –2016. – №1(22). –С. 59-64.

16. **Шепс Р.А.** Оценка прогнозируемого энергозамещения зданий с использованием систем солнечного тепло- и холодоснабжения / Т. В. Щукина, Д. М. Чудинов, В. В. Шичкин, И. А. Потехин, Р. А. Шепс // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. – 2018. – № 1 (4). –С. 54-61.

#### **Статьи в БД Scopus**

17. **Шепс Р.А.** Passive Solar Heating: How to Control the Heating Regime / Т. В. Щукина, Р. А. Шепс // International journal of environmental and science education. – 2016. – Vol. 11. – NO. 18.– pp. 11361-11373

18. **Шепс Р.А.** Перспективы и последствия СИП-технологий для малоэтажного строительства / Т. В. Щукина, Р. А. Шепс // Технология текстильной промышленности. – 2016. – № 5 (365). – с. 215-219.

19. **Шепс Р.А.** Constructive solutions of energy-active fences for solar radiation utilization and methodological arguments for their economic efficiency / R. A. Sheps, T. V. Shchukina, I. I Akulova //В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety (ICCATS 2017). –2017. – С. 012054.

20. **Шепс Р.А.** Research of air pollution by dust aerosols during construction / S. A. Jaremenko, K. V. Garmonov, R. A. Sheps // В сборнике: IOP Conference Se-

ries: Materials Science and Engineering International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety (ICCATS 2017). –2017. – С. 012189.

**Патенты и свидетельство об официальной регистрации  
программы для ЭВМ**

21. Патент 2604119 Российская Федерация, МКИ F24J 2/24, F24J 2/34, F24J 2/14, F24J 2/16. Солнечный тепловой коллектор/ Т. В. Щукина, И. И. Полосин, Р. А. Шепс, Я. И. Караваева -№2015106253; заявлено 24.02.2015; опубл. 10.09.2016.; Бюл. №25. – 8 с.

22. Свид. 2018612863 Российская Федерация. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Программа расчета температуры в четырехслойной панели с переменным тепловым потоком / Р. А., Шепс, С. А. Яременко, Т. В. Щукина, М. В. Агафонов; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО ВГТУ (RU). – №201766677; заявл. 23.10.17; опубл. 01.03.18.

Шепс Роман Александрович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ НАРУЖНЫХ  
ОГРАЖДЕНИЙ ЗДАНИЙ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ**

05.23.03 - Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха,  
газоснабжение и освещение

**Автореферат**

Подписано в печать г. Формат 60x84/8

Бумага писчая. Объем 1,5 уч. изд. л.

Тираж 100 экз. Заказ №

Отпечатано в типографии

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»  
394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84