

На правах рукописи



Чулков Александр Анатольевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗДАНИЙ,  
ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ В УСЛОВИЯХ ПЕРЕМЕННОГО  
ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА**

Специальность 05.23.03

«Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха,  
газоснабжение и освещение»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Пенза – 2020

Диссертация выполнена в ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет».

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент  
**Вытчиков Юрий Серафимович**

Официальные оппоненты: **Гримитлин Александр Моисеевич**,  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский  
государственный архитектурно-  
строительный университет»,  
профессор кафедры  
«Теплогазоснабжение и вентиляция»

**Щукина Татьяна Васильевна**,  
кандидат технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный  
технический университет», доцент кафедры  
«Жилищно-коммунальное хозяйство»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Томский государственный  
архитектурно-строительный университет»

Защита состоится «26» февраля 2021г. в 14.00 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, ПГУАС, 1 корпус, конференц-зал.

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

Автореферат разослан “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 20 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Бикунова Марина Викторовна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования.

В связи с реализацией в Российской Федерации федерального закона №261 от 23.11.2009 «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности» и роста цен на энергоносители в настоящее время уделяют большое внимание рациональному использованию тепловой энергии при эксплуатации зданий.

Основное снижение расхода тепла на отопление зданий осуществляется за счёт повышения теплозащитных свойств ограждающих конструкций.

В СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» приведены современные нормативные требования по теплозащите, включающие выполнение санитарно-гигиенических и комфортных условий, а также условие энергосбережения.

В указанном выше нормативном документе приведен перечень зданий и сооружений, на которые условие энергосбережения не распространяется.

К ним относятся жилые и общественные здания с периодическим отоплением – загородные коттеджи, бытовые здания, вахтовки и т.д.

Тепловой режим таких зданий является нестационарным в связи с периодичностью работы системы отопления и изменением температуры внутреннего воздуха в процессе их эксплуатации.

Удельная характеристика расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания является величиной, характеризующей класс энергоэффективности здания. Данную величину определяют на стадии проектирования расчетным путем, исходя из архитектурных решений, климатических условий района строительства, состава ограждающих конструкций, кратности воздухообмена, выбора системы отопления, применения высокоэффективных энергосберегающих технологий.

В связи с этим, при проектировании зданий индивидуальной жилой застройки необходимо учитывать все вышеуказанные факторы и тщательно подходить к выбору конструктивных решений, а также инженерных систем жизнеобеспечения. На загородном участке при большом количестве

отапливаемых зданий целесообразно спроектировать отдельно стоящий источник тепловой энергии, позволяющий удовлетворить потребность в тепловой энергии всего комплекса строений. Для уменьшения тепловых потерь от трубопроводов тепловых сетей необходимо выбирать высокоэффективную тепловую изоляцию трубопроводов, также позволяющую при аварийных ситуациях увеличить время остывания теплоносителя в трубах.

Грамотный выбор ограждающих конструкций, системы теплоснабжения, элементов системы отопления позволяет уменьшить энергозатраты на обогрев зданий и в конечном итоге повысить энергетическую эффективность рассматриваемого жилого комплекса, что предопределяет актуальность исследований по данной тематике.

### **Степень разработанности темы исследования.**

Большой вклад в решение задач по повышению энергоэффективности зданий и сооружений внесли исследования российских и зарубежных ученых, опубликованные в монографиях и научных статьях, изучение которых позволило сформулировать задачи диссертационной работы.

Многие вопросы, касающиеся энергоэффективности зданий и сооружений, рассмотрены в работах российских ученых Б.А. Семенова, В.Н. Богословского, Е.Г. Малявиной, Д.Ю. Петрова, Е.Ю. Анисимовой, В.И. Панферова, Т.А. Дацюк, Ю.П. Ивлева, В.А. Пухкала, В.Г. Гагарина, Ю.А. Табунщикова, Ю.С. Вытчикова, А.Г. Кочева, Н.А. Цветкова, А.И. Еремкина, А.М. Берегового, А.М. Гримитлина, Т.В. Шукиной. Исследования этих ученых указывают на большие перспективы в области прерывистого отопления.

Однако в связи с недостаточной изученностью данной темы и отсутствия методик теплотехнического расчета ограждающих конструкций и элементов системы отопления в условиях переменного теплового режима необходимо дальнейшее исследование данной проблемы, что делает тему исследования актуальной.

**Цель диссертационной работы** заключается в разработке инженерных методов теплотехнического расчета ограждающих конструкций, отопительных

приборов, тепловой изоляции трубопроводов для зданий и сооружений, эксплуатируемых в условиях переменного теплового режима.

**Задачи исследования:**

- математическое моделирование тепловых процессов в ограждающих конструкциях зданий и сооружений, эксплуатируемых в условиях переменного теплового режима;
- разработка инженерной методики расчета динамических характеристик отопительных приборов;
- разработка инженерной методики расчета динамических характеристик ограждений зданий;
- экспериментальные исследования динамических характеристик отопительных приборов;
- разработка высокоэффективной тепловой изоляции трубопроводов системы теплоснабжения;
- оптимизация конструктивных решений ограждающих конструкций зданий с прерывистым отоплением.
- технико-экономическое обоснование применения прерывистого отопления для зданий и сооружений.

**Объектом исследования** являются ограждающие конструкции, элементы системы отопления и теплоснабжения зданий индивидуальной застройки, эксплуатируемые в условиях прерывистого отопления.

**Предметом исследования** являются динамические характеристики ограждающих конструкций зданий и элементов систем отопления, теплозащитные характеристики наружных стен и энергозатраты на эксплуатацию зданий при прерывистом отоплении.

**Научная новизна полученных результатов:**

- получены аналитические зависимости для определения энергозатрат и времени нагрева многослойных ограждений, а также математическая зависимость для расчета максимально допустимого значения толщины

теплоизоляционного материала наружного ограждения здания, работающего в условиях переменного теплового режима;

- разработана математическая модель и получены математические зависимости для определения энергозатрат и времени нагрева ограждающих конструкций с экранной теплоизоляцией, установлена аналитическая зависимость между энергозатратами и толщиной воздушной прослойки;

- на основе решения нестационарной задачи теплопередачи получена формула для нахождения времени нагрева отопительных приборов, а также проведена оценка времени нагрева радиаторов, выполненных из различных материалов, по результатам теоретического и экспериментального исследования;

- предложена новая защищенная патентом конструкция тепловой изоляции трубопроводов систем теплоснабжения на основе пенополиуретановых скорлуп.

**Теоретическая и практическая ценность работы** заключается в том, что на основе теоретического исследования предложена методика определения времени нагрева и энергозатрат многослойных ограждений зданий, эксплуатируемых в условиях переменной тепловой нагрузки. Разработаны конструкции ограждения стен, обладающие минимальными энергозатратами на их нагрев. Предложена методика оценки энергетической эффективности зданий, эксплуатируемых в условиях переменного теплового режима.

На основе анализа теоретических и экспериментальных исследований получены значения времени выхода различных отопительных приборов на стационарный режим работы. Для трубопроводов системы теплоснабжения зданий и сооружений разработана модель высокоэффективной тепловой изоляции, получен патент на полезную модель.

**Методология и методы исследования:** методы математической физики и теории тепломассообмена, экспериментальные и теоретические методы исследования инженерных систем и ограждающих конструкций.

**Достоверность полученных результатов** исследования обеспечена применением современных методов инженерных расчетов, а также поверенного лабораторного оборудования. Все исследования и расчеты выполнены согласно нормативной документации и государственных стандартов.

Экспериментальные исследования теплозащитных характеристик ограждающих конструкций и динамических характеристик отопительных приборов выполнены в аккредитованной лаборатории СамГТУ. В натуральных условиях произведена оценка теплозащитных характеристик тепловой изоляции трубопроводов систем теплоснабжения.

**Апробация результатов исследований.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на Третьем специализированном форуме «Девелопмент. Строительство. Ресурсосбережение» в рамках программы «Энергосбережение в строительстве и ЖКХ» (Тольятти, 2014 г.), международной научной конференции «Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании», проходившей 16-17 ноября 2016 г. в МГСУ, город Москва, областном конкурсе Самарской области «Молодой ученый» в номинации Технические науки, Строительство за 2016-2017 г., на 10 – ой межрегиональной специализированной выставке «Малоэтажное и коттеджное строительство», проходившей 12-15 апреля 2018 г. в г. Самара, научно-техническом совещании «Применение искусственных пористых заполнителей и изделий на их основе в жилищном, гражданском, промышленном, дорожном и гидротехническом строительстве», проходившем 26-27 сентября 2018 г. на базе АО «НИИКерамзит» в г. Самара.

**На защиту выносятся:**

- аналитические зависимости, позволяющие определить время и энергозатраты на нагрев однослойных и многослойных ограждающих конструкций;
- результаты экспериментального исследования времени нагрева стены;
- результаты теоретических исследований влияния экранной тепловой изоляции на энергозатраты;

- результаты теоретических и экспериментальных исследований определения динамических характеристик отопительных приборов;
- запатентованная конструкция тепловой изоляции трубопроводов, позволяющая существенно снизить тепловые потери;
- аналитические зависимости для определения максимально допустимого значения толщины тепловой изоляции для однослойных и двухслойных ограждений.

**Публикации.** Основные положения диссертации отражены в 17 научных работах, из них 2 статьи в БД Scopus, 7 статей – в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ, в том числе получен один патент РФ на полезную модель.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 5 глав, общих выводов, приложений и списка литературы (97 наименований). Объем диссертации составляет 163 страницы, включая 31 таблицу, 76 рисунков, 7 приложений.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** рассмотрены вопросы актуальности исследования, поставлены его цели и задачи, выбрана методика исследований, сформулирована научная новизна и практическая значимость работы. Приведены структура и объем работы, а также ее краткое содержание.

**В первой главе** приводится краткий обзор научных работ в области исследования процессов нестационарной теплопередачи в ограждениях зданий, отопительных приборах и тепловой изоляции трубопроводов.

Анализ отечественных и зарубежных научных исследований по теме диссертации позволил сформулировать следующие проблемы:

- отсутствует инженерная методика оценки энергетических затрат для зданий, эксплуатируемых в условиях прерывистого отопления;
- отсутствуют рекомендации по проектированию ограждающих конструкций для зданий с прерывистым отоплением;



- отсутствует инженерная методика определения динамических характеристик отопительных приборов.

Проведенный анализ литературных источников позволил сформулировать цель и задачи диссертационного исследования, заключающиеся в разработке инженерных методов расчета динамических характеристик отопительных приборов, ограждающих конструкций и энергетических затрат при эксплуатации зданий в условиях переменного теплового режима.

**Во второй главе** представлено теоретическое и экспериментальное исследование процесса нестационарной теплопередачи через ограждающие конструкции зданий в условиях переменного теплового режима.

На рисунке 1 схематично представлен процесс нагрева наружной однослойной стены.

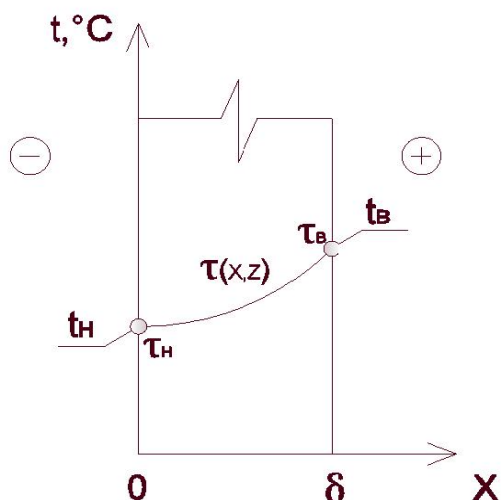


Рисунок 1. Схематизация процесса нагрева наружной стены в условиях краевой задачи.

При значении безразмерной координаты  $X=1$ , выражение для определения относительной температуры внутренней поверхности ограждения имеет вид:

$$\vartheta(1, Z) = 1 + K + \frac{K}{Bi} - K \sum_{n=1}^{\infty} D_n \exp(-\mu_n^2 \cdot Fo). \quad (1)$$

Безразмерный комплекс  $K$  определяется по формуле:

$$K = \frac{(t_s - t_n) \cdot \delta}{R_0 \cdot \lambda \cdot t_n}, \quad (2)$$

где  $t_g; t_n; \delta; \lambda; R_0$  - температура внутреннего воздуха, °С; температура наружного воздуха, °С; толщина ограждения, м; коэффициент теплопроводности материала ограждения, Вт/(м·°С); сопротивление теплопередаче глади наружной стены, (м<sup>2</sup>·°С)/Вт.

Безразмерный коэффициент определяется по формуле:

$$D_n = \frac{2(\mu_n^2 + Bi^2)}{\mu_n^2(\mu_n^2 + Bi^2 + Bi)}, \quad (3)$$

где  $\mu_n$  - корень трансцендентного уравнения;  $Bi = \frac{\alpha_n \cdot \delta}{\lambda}$  - критерий Био,

$\alpha_n$  - коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности ограждения, Вт/(м<sup>2</sup>·°С).

Формула для определение критерия Фурье имеет вид:

$$Fo = \frac{\alpha_n \cdot z}{\delta^2}, \quad (4)$$

где  $z$  – время нагрева стены, ч.

Введем понятие безразмерной температуры на внутренней поверхности ограждения, определяемой по следующей формуле:

$$\Theta_g = \frac{\tau_g - \tau_n}{\tau_{g \max} - \tau_n}. \quad (5)$$

В результате выражение, связывающее относительную и безразмерную температуры на внутренней поверхности стены, примет вид:

$$\mathcal{G}(1, z) = 1 + \frac{(R_0 \cdot \alpha_g - 1)(t_g - t_n)}{t_n \cdot R_0 \cdot \alpha_g} \Theta_g. \quad (6)$$

Анализ аналитического решения (1) показал, что при значении критерия Фурье  $Fo > 0,2$  в расчетах следует использовать только первый член ряда, при этом погрешность составляет не более 1%.

Формула для определения времени нагрева наружной стены при  $\Theta = 0,95$  примет вид:

$$Z_n = -\frac{\delta^2}{\mu_1^2 \cdot a} \ln \frac{1 + K + \frac{K}{Bi} - 1 - \frac{(R_0 \cdot a_\epsilon - 1) \cdot (t_\epsilon - t_n)}{t_n \cdot R_0 \cdot a_\epsilon} \cdot \Theta_\epsilon}{K \cdot D_1}, c, \quad (7)$$

где  $a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}$  - коэффициент температуропроводности материала

стены, м<sup>2</sup>/с;  $a_\epsilon$  - коэффициент теплоотдачи со стороны внутренней поверхности стены, Вт/(м<sup>2</sup>·°С).

Для нахождения средней относительной температуры стенки проинтегрируем выражение (1) используя только первый член ряда:

$$\mathcal{G}_{cp} = 1 + \frac{K}{Bi} + \frac{K}{2} - \frac{K}{\mu_1} \cdot D_1 \cdot e^{-\mu_1^2 \cdot F_0} \cdot \sin \mu_1. \quad (8)$$

Тогда формула для определения средней температуры стенки примет вид:

$$\tau_{cp} = \mathcal{G}_{cp} \cdot t_n, \text{°С}. \quad (9)$$

Энергозатраты на нагрев стенки определяются по формуле:

$$Q_n = c \cdot \rho \cdot \delta \cdot (\tau_{cp} - t_n), \text{Дж/м}^2, \quad (10)$$

где  $c$  - удельная теплоемкость, Дж/кг·°С;  $\rho$  - плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;

$\delta$  - толщина ограждения, м.

На рисунке 2 представлены результаты расчета в виде зависимости безразмерной температуры  $\Theta_\epsilon$  от безразмерной координаты  $X$  при различных критериях Фурье  $F_0$  для однослойной наружной стены. Конструкция стены выполнена из керамзитобетонных блоков плотностью  $\rho=900$  кг/м<sup>3</sup>, толщиной 0,39 м на цементно – песчаном растворе.

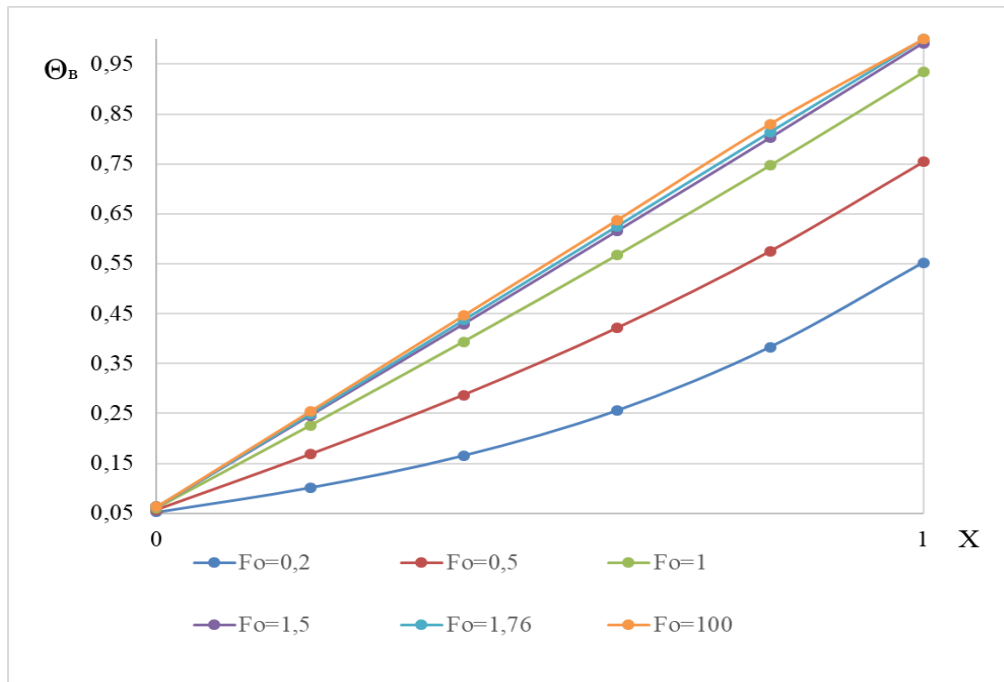


Рисунок 2. Зависимость безразмерной температуры на внутренней поверхности ограждения от безразмерной координаты X при различных значениях критерия Фурье.

Далее представлено решение задачи по определению времени и энергозатрат на нагрев ограждений в условиях переменного теплового режима приближенным аналитическим методом.

Формула для определения времени нагрева многослойных ограждающих конструкций имеет вид:

$$Z_n = 2 \cdot \frac{Q_n}{q_{om}} \cdot \frac{1+2\varphi}{1+\varphi}, \text{с}, \quad (11)$$

где  $q_{om} = \frac{t_{e2} - t_n}{R_0}$  - удельный тепловой поток, Вт/м<sup>2</sup>;  $\varphi = \frac{R_n}{R_n + R}$  -

безразмерный критерий граничных условий;  $R_n = \frac{1}{\alpha_n}$ , (м<sup>2</sup>·°C)/Вт;

$R = \sum_{i=1}^n R_i$ , (м<sup>2</sup>·°C)/Вт;  $R_i = \frac{\delta_i}{\lambda_i}$ , (м<sup>2</sup>·°C)/Вт - термическое сопротивление

i - го слоя.

Выражение для определения удельных затрат тепловой энергии на нагрев многослойных ограждающих конструкций при наличии дежурного отопления представлено в виде:

$$Q_n = \sum_{i=1}^n c_i \cdot \rho_i \cdot \delta_i \cdot \Delta \tau_i, \text{ Дж/м}^2, \quad (12)$$

Изменение температуры  $i$  - го слоя многослойного ограждения определялось по формуле:

$$\Delta \tau_i = t_{e2} - t_{e1} - \frac{t_{e2} + t_{n1} - t_{e1} - t_{n2}}{2 \cdot R_0} \cdot \left( \frac{2}{\alpha_s} + \sum_{i=1}^{i-1} R_i + \sum_{i=1}^i R_i \right), \text{ }^\circ\text{C}, \quad (13)$$

где  $t_{e1}$ ,  $t_{e2}$ ,  $^\circ\text{C}$  - температуры внутреннего воздуха в режиме дежурного отопления и на расчетном в рассматриваемом помещении.

В случае отсутствия смежных помещений температура внутреннего воздуха в режиме дежурного отопления  $t_{n1}$  и температура внутреннего воздуха в расчетном режиме  $t_{n2}$  принимается равной  $t_n$ . При наличии смежных помещений данные величины находятся из уравнения теплового баланса.

Для однослойных наружных ограждений величина  $\Delta \tau$  может быть определена по формуле:

$$\Delta \tau = 0,5(t_{e2} - t_{e1}) - \frac{t_{e2} - t_{e1}}{2R_0} \left( \frac{1}{\alpha_s} - \frac{1}{\alpha_n} \right), \text{ }^\circ\text{C}. \quad (14)$$

Для подтверждения результатов математического моделирования процесса нагрева наружных ограждений был проведен эксперимент в климатической камере по определению времени нагрева стены. Стена выполнена в виде кладки из пустотелых керамзитобетонных блоков на цементно - песчаном растворе толщиной  $\delta=0,25$  м, оштукатуренных с обеих сторон цементно-песчаным раствором.

На рисунке 3 представлены результаты экспериментального исследования процесса теплопередачи через фрагмент наружной стены.

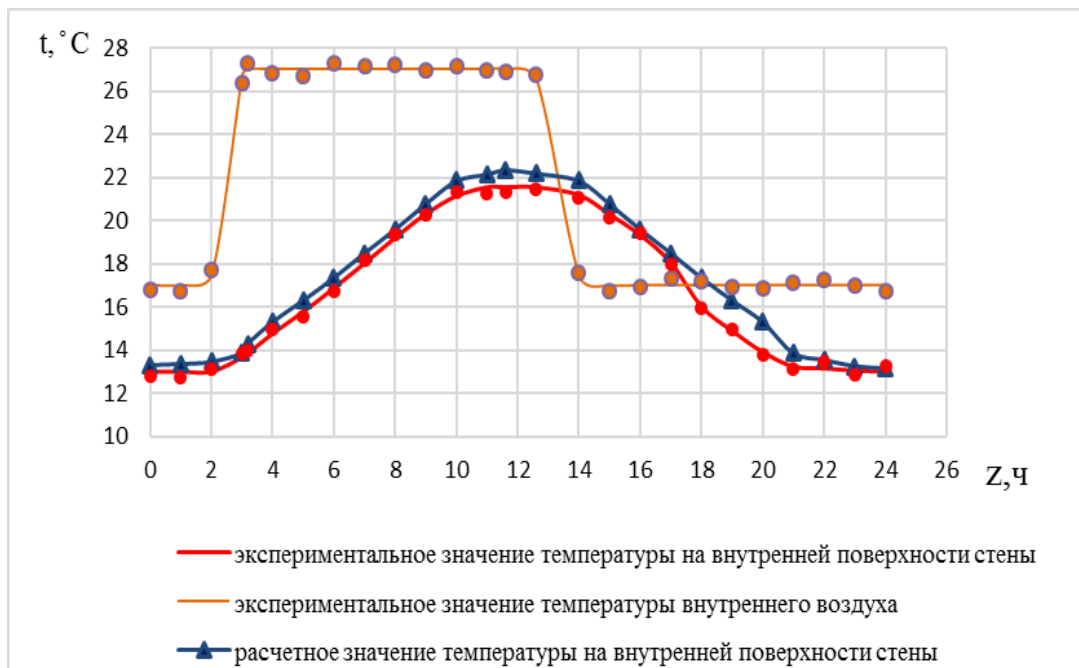


Рисунок 3. Результаты исследования процесса нестационарной теплопередачи через наружную стену.

Время нагрева стены по результатам экспериментальных данных составило 10,56 ч, расчетное значение приближенным аналитическим методом составило 9,92 ч. Погрешность полученных значений составила 6%.

По результатам математической обработки экспериментальных данных были получены формулы для определения температур на внутренней поверхности ограждения в процессе его нагрева (15) и охлаждения (16).

$$\tau_e = \tau_{e1} + \Theta_e \cdot (\tau_{e2} - \tau_{e1}), \text{ } ^\circ\text{C.} \quad (15)$$

$$\tau_e = \tau_{e2} - \Theta_e \cdot (\tau_{e2} - \tau_{e1}), \text{ } ^\circ\text{C.} \quad (16)$$

Для оценки точности предложенного аналитического метода расчета удельных энергозатрат и времени нагрева наружных ограждений был выполнен расчет пяти вариантов исполнения однослойных наружных стен двумя вышеуказанными методами. Удельные энергозатраты рассчитывались по формулам (10) и (12), время нагрева – по формулам (7) и (11). В рассмотренных вариантах исполнения ограждений сопротивление теплопередаче составило от 1,07 до 2,94 (м<sup>2</sup>·°C)/Вт. Расчеты выполнены при отсутствии дежурного отопления. Анализ результатов расчетов показал, что относительная

погрешность в определении удельных энергозатрат приближенным аналитическим методом составила не более 7 %, времени нагрева – не более 12,4 %.

Было выполнено теоретическое исследование влияния экранной тепловой изоляции на время нагрева и энергозатраты для четырех различных вариантов ограждающих конструкций в условиях прерывистого отопления.

Наружное ограждение выполнено в виде конструкции, состоящей из 5 слоев. Первый слой выполнен из гипсокартоновых листов толщиной 0,02 м, второй слой представляет собой воздушную прослойку толщиной 0,01 м, третий слой - пенофол толщиной 0,01 м, четвертый слой - цементно-песчаный раствор толщиной 0,015 м. Несущий пятый слой выполнен в виде кладки из силикатного кирпича на цементно-песчаном растворе толщиной 510 и 640 мм, а также пустотелого керамического кирпича толщиной 510 мм различной плотности.

Результаты расчетов представлены на рисунке 4 в виде зависимости безразмерных удельных энергозатрат ( $Q_n/Q_0$ ) на нагрев наружной стены от толщины воздушной прослойки.

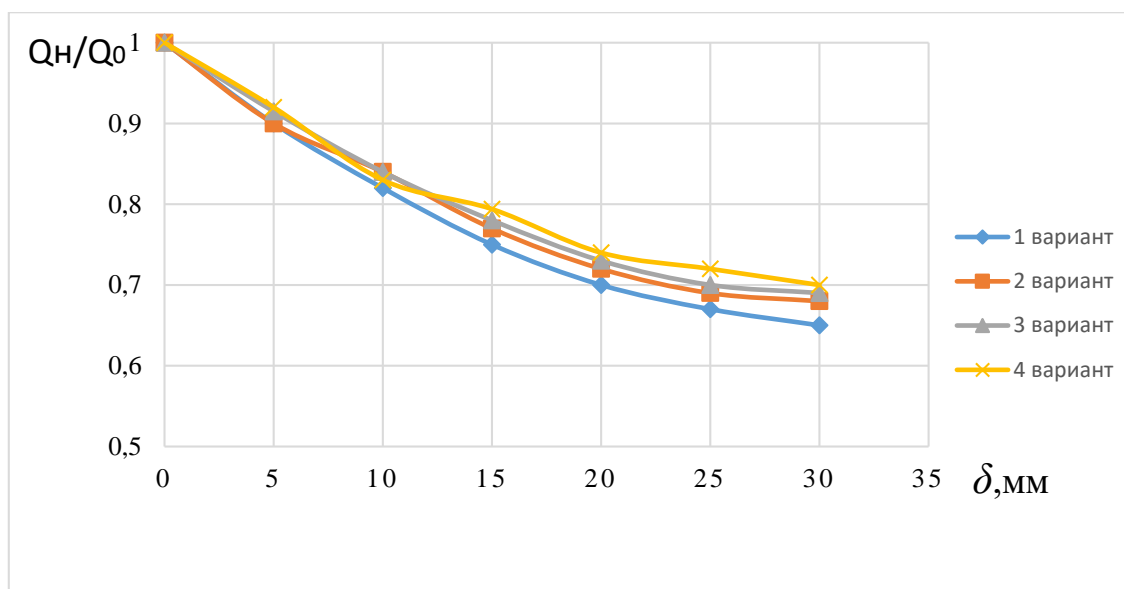


Рисунок 4. Зависимость удельных энергозатрат на нагрев наружной стены от толщины воздушной прослойки.  $Q_n, Q_0$  - удельные энергозатраты при наличии и отсутствии воздушной прослойки, кДж/м<sup>2</sup>.

В результате исследований получена формула для определения энергозатрат на нагрев ограждений в зависимости от толщины воздушной прослойки  $Q_n = f(\delta)$ .

$$Q_n = Q_0 \cdot (1 - 26,2 \cdot \delta + 474,6 \cdot \delta^2), \text{ кДж/м}^2, \quad (17)$$

где  $Q_0$  - энергозатраты на нагрев ограждений при отсутствии воздушной прослойки, кДж/м<sup>2</sup>;  $\delta$  - толщина воздушной прослойки, м.

Результаты расчетов наружных стен, утепленных с помощью экранной тепловой изоляции позволили установить, что энергозатраты на их нагрев снижаются от 27 до 39 %.

**В третьей главе** представлено теоретическое и экспериментальное исследование процесса нестационарной теплопередачи в отопительных приборах. Время нагрева отопительных приборов определялось в результате решения нестационарной задачи теплообмена без учета изменения температуры по толщине стенки радиатора.

Аналитическое решение для определения безразмерной температуры стенки радиатора имеет вид:

$$\theta = 1 - e^{-\frac{\alpha \cdot F_{cm} \cdot Z}{m \cdot c}}, \quad (18)$$

где  $\alpha$  - значение коэффициента теплоотдачи отопительного прибора, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  $F_{cm}$  - поверхность теплообмена отопительного прибора, м<sup>2</sup>;

$Z$  - время, с;  $m$  - масса отопительного прибора, кг;  $c$  - удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·°С).

Выражение для определения времени нагрева отопительного прибора представлено в виде:

$$Z_n = 3 \cdot \frac{m \cdot c}{\alpha \cdot F_{cm}}, \text{ с.} \quad (19)$$

На рисунке 5 приведены результаты расчета времени нагрева отопительных приборов.



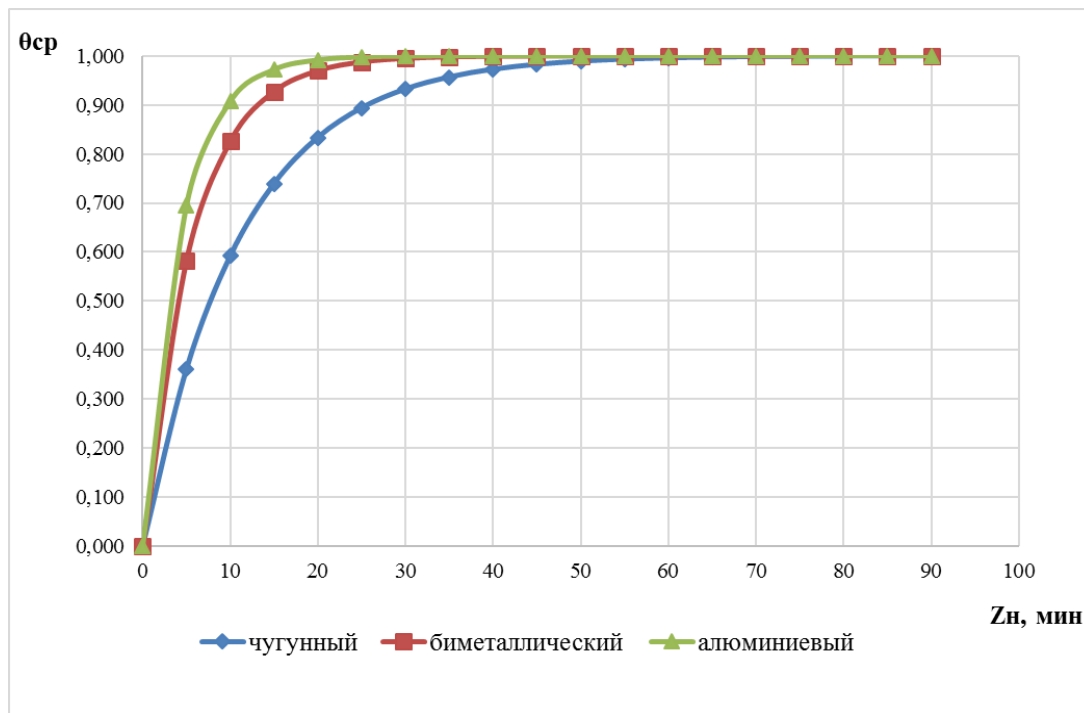


Рисунок 5. Зависимость безразмерной температуры отопительных приборов от времени.

Для подтверждения результатов математического моделирования был проведен эксперимент в теплотехнической лаборатории СамГТУ.

В результате проведенных исследований для инженерных расчетов времени нагрева отопительных приборов рекомендована формула, полученная на основе сравнения экспериментальных и расчетных значений:

$$Z_n = \beta \cdot \frac{m \cdot c}{\alpha \cdot F_{cm}}, \text{ с}, \quad (20)$$

где  $\beta$  – поправочный коэффициент, учитывающий марку отопительного прибора.

Для алюминиевого прибора  $\beta=1,11$ ; биметаллического  $\beta=0,78$ ; чугунного  $\beta=0,65$ .

Найденные в процессе исследования значения времени нагрева отопительных приборов использовались компанией ООО «АСК ТЕХНОСТРОЙ» при проектировании системы отопления комплекса загородных домов на территории РФ и республики Казахстан.

**Четвертая глава** посвящена исследованию тепловых процессов в изолированных трубопроводах систем теплоснабжения зданий.

Рассмотрено несколько вариантов защиты скорлуп из пенополиуретана с использованием тепловых экранов.

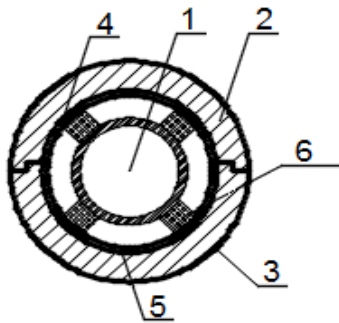
В таблице 1 представлены результаты теоретического и экспериментального исследования изолированного трубопровода.

Таблица 1. Результаты исследования теплового состояния изолированного трубопровода.

№ п/п	Вид изоляции	Удельный тепловой поток $q_l, \text{Вт/м}$		Температура на внутренней поверхности скорлупы $t_{w3}, ^\circ\text{C}$		Перепад температур между теплоносителем и внутренней поверхностью скорлупы $\Delta t, ^\circ\text{C}$	
		расчет	эксперимент	расчет	эксперимент	расчет	эксперимент
1	Воздушный зазор + алюминиевая фольга + пенополиуретан	11,45	11,0	44,4	44,0	15,6	16,0
2	Воздушный зазор + пенополиуретан	14,05	13,74	53,7	53,0	6,3	7,0

По результатам расчетов, представленных в таблице 1 следует, что конструкция тепловой изоляции, состоящая из ППУ скорлупы с воздушной прослойкой, экранированной алюминиевой фольгой, существенно снижает тепловые потери трубопровода.

На основании проведенных исследований получен патент на полезную модель №178409 «Теплоизоляционное изделие из пенополиуретана». На рисунке 6 представлена конструкция изобретения тепловой изоляции трубопровода.



Теплоизоляционное изделие из пенополиуретана включает в себя верхнюю (2) и нижнюю (3) скорлупы. На внутреннюю часть верхней (2) и нижней (3) скорлуп смонтирована алюминиевая фольга (4) и (5).

При этом в качестве закладных элементов используются керамические вставки (6) для обеспечения равномерного по толщине воздушного зазора между трубопроводом (1) и скорлупами (2) и (3).

Рисунок 6. Конструкция тепловой изоляции трубопровода системы теплоснабжения.

В пятой главе рассмотрены вопросы оптимального выбора толщины наружных ограждений, а также технико-экономическое обоснование использования отопления с переменным режимом работы.

Толщина однослойных наружных ограждений для зданий с прерывистым отоплением определялась исходя из условия обеспечения заданного времени нагрева и нормативных требований по теплозащите.

Получена формула для нахождения максимальной толщины однослойной наружной стены вида:

$$\delta_{\max} = -\frac{\lambda}{\alpha_n} + \sqrt{\frac{\lambda^2}{\alpha_n^2} + \frac{\lambda \cdot Z_{mp.} \cdot t_{e2} - t_n}{\rho \cdot c \cdot A \cdot t_{e2} - t_{e1}}}, \text{ м.} \quad (21)$$

Наряду с однослойными наружными стенами при строительстве загородных индивидуальных домов нашли широкое применение конструкции двухслойного исполнения наружных стен.

Выражение для определения максимально допустимого значения сопротивления теплопередаче гряди наружной стены, обеспечивающего необходимое время ее нагрева представлено вида:

$$R_{O_{\max}}^{усл} = \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{1}{\alpha_6} - \frac{c_1 \cdot \rho_1 \cdot \delta_1}{c_2 \cdot \rho_2 \cdot \lambda_2} + \sqrt{\left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{1}{\alpha_6} - \frac{c_1 \cdot \rho_1 \cdot \delta_1}{c_2 \cdot \rho_2 \cdot \lambda_2}\right)^2 + B}, (\text{м}^2 \cdot \text{°C})/\text{Вт}, \quad (22)$$

$$B = \frac{c_1 \cdot \rho_1 \cdot \delta_1}{c_2 \cdot \rho_2 \cdot \lambda_2} \cdot \left(\frac{2}{\alpha_6} + \frac{\delta_1}{\lambda_1}\right) - \left(\frac{1}{\alpha_6} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{1}{\alpha_n}\right) \cdot \left(\frac{1}{\alpha_6} - \frac{1}{\alpha_n} + \frac{\delta_1}{\lambda_1}\right) + \frac{\tau_n \cdot (t_{e2} - t_n)}{A \cdot (t_{e2} - t_{e1}) \cdot c_2 \cdot \rho_2 \cdot \lambda_2}, \quad (23)$$

где  $A = \frac{1 + 2 \cdot \varphi}{1 + \varphi}$  - безразмерный коэффициент.

Максимально допустимое значение толщины теплоизоляционного материала для двухслойных конструкций определялось по формуле:

$$(\delta_2)_{\max} = \lambda_2 \cdot \left( R_{o_{\max}}^{учл} - \frac{1}{\alpha_e} - \frac{\delta_1}{\lambda_1} - \frac{1}{\alpha_n} \right), \text{ м.} \quad (24)$$

Минимальная толщина утеплителя определялась исходя из соблюдения санитарно-гигиенических и комфортных условий по формуле:

$$(\delta_2)_{\min} = \lambda_2 \cdot \left( \frac{t_{e2} - t_n}{\alpha_e \cdot \Delta t_n \cdot r} - \frac{1}{\alpha_e} - \frac{\delta_1}{\lambda_1} - \frac{1}{\alpha_n} \right), \text{ м.} \quad (25)$$

На примере коттеджного поселка на 40 домов выполнен расчет технико-экономических показателей применения прерывистого отопления. Результаты расчета представлены в таблице 2.

Таблица 2. Годовые показатели при эксплуатации коттеджного поселка.

Система отопления	Годовые теплотери, МДж	Расход газа на отопление, м <sup>3</sup>	Затраты, руб.
Стационарная	4683510,4	156442,41	783776,47
Прерывистая	3161417,2	105600,22	529056

Таким образом, расчетный экономический эффект от применения прерывистой системы отопления составляет: 254720, 47 руб. за год эксплуатации (в ценах 2019 г.).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе проведенных исследований получены приближенные аналитические зависимости для определения энергозатрат и времени нагрева ограждений зданий, эксплуатируемых в условиях прерывистого отопления.

Экспериментальные данные, полученные по нагреву однослойной стенки, показали высокую степень достоверности результатов математического моделирования. Проведенное исследование процесса нестационарной теплопередачи наружных ограждений, утепленных экранной тепловой изоляцией с применением фольгированного пенофола с воздушной прослойкой позволило установить, что энергозатраты на их нагрев снижаются

от 27 до 39%. Установлена аналитическая зависимость между энергозатратами на нагрев ограждений и толщиной воздушной прослойки.

Разработанная методика определения энергозатрат и времени нагрева ограждающих конструкций рекомендуется для проектирования зданий, эксплуатируемых в условиях переменной отопительной нагрузки.

2. В результате выполненных теоретических и экспериментальных исследований процесса нестационарной теплопередачи в отопительных приборах получено аналитическое решение для определения безразмерной температуры стенки и времени нагрева радиаторов, а также разработана инженерная методика расчета динамических характеристик отопительных приборов. Экспериментальным путём получен поправочный коэффициент в формуле для расчета времени нагрева, учитывающий влияние материала и конструктивные особенности отопительного прибора. Полученные в результате исследований данные рекомендовано учитывать при проектировании систем отопления зданий и сооружений, эксплуатируемых в условиях прерывистого отопления.

3. Разработана высокоэффективная конструкция тепловой изоляции трубопроводов систем теплоснабжения с применением экранированных пенополиуретановых скорлуп, позволяющих за счет наличия воздушной прослойки снизить расход теплоизолирующего материала на 35%. Проведенные теоретические исследования процесса остывания изолированного трубопровода при нарушении циркуляции воды показали, что с увеличением толщины воздушной прослойки увеличивается время остывания теплоносителя до значений, достаточных для устранения аварийных ситуаций.

Разработанная конструкция тепловой изоляции используется в настоящее время в системах теплоснабжения на территории Самарской области.

4. Исходя из значений требуемого времени нагрева наружных ограждений получены аналитические зависимости для определения максимально допустимой толщины однослойной наружной стены и

максимальной толщины теплоизоляционного слоя в двухслойных наружных стенах, утепленных вентфасадом или сайдингом.

5. Оценка энергосберегающего эффекта от применения прерывистого отопления была произведена для 40 домов коттеджного поселка, эксплуатируемых лишь в выходные дни. Расчет показал, что за счет использования дежурного отопления в рабочие дни энергозатраты снизились на 32,5 %. Расчетный годовой экономический эффект за отопительный сезон составил 254720,47 рублей в ценах 2019 года.

6. Предложенная конструкция тепловой изоляции трубопроводов использована ООО НПФ «ПОИСК» при реконструкции теплотрасс на производственных площадках ОАО «Роснефть». Методики теплотехнических расчетов ограждающих конструкций и элементов систем отопления использованы ООО «АСК ТЕХНОСТРОЙ» при проектировании и строительстве индивидуальных жилых домов на территории РФ и республике Казахстан.

### СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. Вытчиков, Ю.С. Повышение эффективности и долговечности тепловой изоляции трубопроводов систем теплоснабжения с применением скорлуп из пенополиуретана / Ю.С. Вытчиков, Л.Д.Евсеев, А.А. Чулков // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. №2. Самара, 2013 г. – С.90-93.

2. Вытчиков, Ю.С. Повышение эффективности теплоизоляции трубопроводов в системах теплоснабжения / Ю.С. Вытчиков, А.А. Чулков // В сборнике: Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительные технологии сборник статей. СГАСУ. Самара, 2013. – С. 296-297.

**3. Вытчиков, Ю.С. Исследование эффективности применения жидкого керамического покрытия «Корунд» в качестве тепловой изоляции трубопроводов систем теплоснабжения / Ю.С. Вытчиков, А.А. Чулков // Научное обозрение.–2014 г. –№4. – С.142-145.**

4. Вытчиков, Ю.С. Методика расчета теплопотерь трубопроводами систем теплоснабжения, проложенными на открытом воздухе / Ю.С. Вытчиков, А.А. Чулков // В сборнике: Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительные технологии сборник статей. СГАСУ. Самара, 2014. – С. 205-206.

**5. Вытчиков, Ю.С. Исследование теплозащитных характеристик торцевой наружной стены многоэтажного жилого здания / Ю.С. Вытчиков, И.Г. Беляков, А.А. Чулков, И.В. Шайхутдинова // Научное обозрение. – 2015. – № 23. –С. 31-35.**

**6. Вытчиков, Ю.С. Тепловизионный контроль качества тепловой защиты зданий и сооружений, утепленных с помощью вентилируемых фасадов / Ю.С. Вытчиков, И.Г. Беляков, А.А. Чулков, И.В. Шайхутдинова // Научное обозрение. – 2015. – № 23. С. 54-58.**

7. Чулков, А.А. Тепловизионный контроль качества тепловой защиты тепловой сети нового пассажирского терминала международного аэропорта Курумоч г. Самары / А.А. Чулков // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. – 2015. – № 2 (19). – С. 107-112.

8. Вытчиков, Ю.С. Математическое моделирование процесса нагрева отопительных приборов / Ю.С. Вытчиков, А.А. Чулков, В.А. Голиков // В сборнике: Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Естественные науки и техносферная безопасность сборник статей. СГАСУ. Самара, 2016. – С. 179-183.

9. Галицков, С.Я. Экспериментальный стенд для исследования динамики теплоотдачи отопительной установки в помещении / С.Я. Галицков, А.А. Чулков, В.А. Голиков, М.А. Назаров // В сборнике: Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительные технологии сборник статей. СГАСУ. Самара, 2016. – С. 466-471.

**10. Чулков, А.А. Исследование динамических характеристик отопительных приборов [Текст]/ А.А. Чулков, Ю.С. Вытчиков, И.В. Кудинов // Градостроительство и Архитектура. –2016. –№4. – С.44-48.**

11. Чулков, А.А. Исследование теплопроводности тепловой изоляции трубопровода системы теплоснабжения / А.А. Чулков, А.С. Прилепский, В.Г. Титов // В сборнике: Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Естественные науки и техносферная безопасность сборник статей. СГАСУ. Самара, 2016. – С. 199-202.

**12. Вытчиков, Ю.С. Теплотехнический расчет перекрытий над неотапливаемым подвалом здания коттеджа, эксплуатируемого в условиях прерывистого отопления / Ю.С. Вытчиков, А.А. Чулков, М.Е. Сапарев // Градостроительство и Архитектура. –2017. –№2. – С. 27-31.**

**13. Вытчиков, Ю.С. Оптимизация выбора уровня теплозащиты ограждающих конструкций зданий, эксплуатируемых в условиях прерывистого отопления / Ю.С. Вытчиков, М.Е. Сапарёв, А.А. Чулков // Промышленное и гражданское строительство. – 2017. – №3. – С. 90-93.**

**14. Чулков, А.А. Исследование теплозащитных характеристик двухслойных наружных стен зданий с прерывистым отоплением / А.А. Чулков // Градостроительство и Архитектура. – 2018.– №4. – С. 15-18.**

15. Yuri Vytchikov, Mikhail Saparev, Alexandr Chulkov. Analyzing screen heat insulation and its effect on energy consumption while heating building envelopes in conditions of intermittent heating // MATEC Web of Conferences 86, IPICSE-2016. DOI: 10.1051/matecconf/20168604019.

16. Yuri Vytchikov, Mikhail Saparev, Alexandr Chulkov. Analyzing energy consumption while heating one-layer building envelopes in conditions of intermittent

heating. MATEC Web of Conferences 106,06013(2017), SPbWOSCE-2016.DOI: 10.1051/matecconf/20171060613.

17. Патент 178409 Российская Федерация, МПК F16L 59/00 (2006.01). Теплоизоляционное изделие из пенополиуретана / А.А. Чулков, Ю.С. Вытчиков, И.В. Кауров - №2016145851; патентообладатель А.А. Чулков, заявлено 22.11.2016, опубл. 03.04.2018.; Бюл. № 10. – 5 с.

**\*Примечание. Жирным шрифтом выделены публикации в изданиях, рекомендованных ВАК.**

Чулков Александр Анатольевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗДАНИЙ,  
ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ В УСЛОВИЯХ ПЕРЕМЕННОГО ТЕПЛООВОГО  
РЕЖИМА**

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

**Автореферат**

Подписано в печать г. Формат 60x84/8

Бумага писчая. Объем 1,5 уч. из. л.

Тираж 100 эк. Заказ №

Отпечатано в типографии

ООО «ЦЕНТР ДОКУМЕНТАЦИИ И КОМПАНИЯ»

443010, г. Самара, ул. Чапаевская, 232а, лит. Б; тел.: (846) 279-19-81