



ПОЛИТЕХ
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

На правах рукописи

Гамаюнова Ольга Сергеевна

**МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК СТЕНОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ**

Специальность: 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Петриченко Михаил Романович
Высшая школа гидротехнического и энергетического строительства, профессор

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

кандидат технических наук
Харьков Никита Сергеевич
Акционерное общество «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт воздушного транспорта Ленаэропроект», Научно-исследовательское управление, руководитель управления

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение высшего образования «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» Министерства обороны Российской Федерации

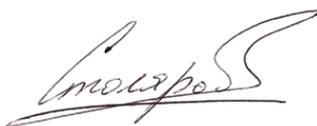
Защита состоится «02» февраля 2021 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета У.05.23.01 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, корпус ГК-2, аудитория 411).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <https://www.spbstu.ru> федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Автореферат разослан «__» _____ 2020 г.

Учёный секретарь диссертационного совета У.05.23.01
кандидат технических наук

Столяров О.Н.



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Современные условия развития строительной отрасли характеризуются увеличением доли объектов строительства (как на этапе возведения, так и на этапе реновации), по отношению к которым реализуются различные конструктивные решения в области повышения энергетической эффективности объектов с целью уменьшения эксплуатационных затрат. Поскольку одним из наиболее распространенных способов повышения энергетической эффективности конструктивных элементов зданий является утепление стеновых (ограждающих) конструкций с использованием теплоизоляционных материалов, особую важность приобретают вопросы обоснования характеристик соответствующих конструктивных решений. Тем не менее, существующие методические разработки и инструментальные средства, применяемые для решения вышеописанных проблем, не обеспечивают полноценного и совместного учета показателей энергетической эффективности (в данный момент также регламентируемых СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий») и экономической целесообразности конструктивных решений.

Поэтому важность проблемы обоснования характеристик конструктивных решений в области повышения энергетической эффективности стеновых (ограждающих) конструкций для строительной отрасли и недостаточная степень научной разработанности указанной проблемы позволяют сделать вывод об актуальности выбранной темы диссертационного исследования.

Степень разработанности темы исследования. Обоснованием характеристик влажностного режима стеновых (ограждающих) конструкций посвятили свои работы: Гагарин В.Г., Зубарев К.П., Козлов В.В., Ахметов В.К., Kaczmarek A., Wesolowska M., Xu C., Li Sh., Zou K. и др. Обоснованием характеристик температурного режима стеновых (ограждающих) конструкций занимались: Куколев М.И., Петриченко М.Р., Чеснокова О.Г., и др. Исследованием изменений нормативных требований к ограждающим конструкциям, технико-экономическим обоснованием конструктивных решений для повышения энергетической эффективности стеновых конструкций занимались: Горшков А.С., Корниенко С.В., Ватин Н.И., Немова Д.В., Рымкевич П.П., Кудревич О.О., Ярцев В.П. и др.

Также был выполнен анализ работ, содержащих описание инструментальных средств (алгоритмов, моделей, методик и т.п.) относящихся к тематике исследования: работы в области технико-экономического обоснования конструктивных решений для повышения энергетической эффективности стеновых конструкций (Горшков А.С., Петров П.В., Резанов Е.М., Стахов А.Е., Андреев А.А., Алексейцев А.В., Иванова В.Р., Karmellos M., Kiprakis A., Wei Yu, Baizhan Li, и др.), работы в области обоснования характеристик влажностного режима стеновых (ограждающих) конструкций (Богословский В.Н., Гагарин В.Г., Зубарев К.П., Ахметов В.К., Фокин К.Ф., Лыков А.В., Лукьянов В.И.), работы в области обоснования характеристик температурного режима стеновых (ограждаю-

щих) конструкций (Куколев М.И., Петриченко М.Р., Панферов В.И., Стахов А.Е., Фролькис В.А.).

Существующие научные разработки в области технико-экономического обоснования характеристик конструктивных решений для повышения энергетической эффективности стеновых (ограждающих) конструкций посредством применения теплоизоляционного материала не в полной мере обеспечивают объективный и совместный учет показателей энергетической эффективности (термическое сопротивление, средняя температура стеновой конструкции) и экономической целесообразности (экономия эксплуатационных затрат, срок окупаемости и др.).

Существующие инструментальные средства, используемые для решения указанной проблемы, обеспечивают относительно невысокую адекватность результатов ввиду особенностей как структуры соответствующих математических моделей, так и процедур их реализации.

Объектом исследования является конструктивное решение стенового ограждения в составе объекта жилищного строительства, предполагающее повышение энергетической эффективности конструкций посредством применения теплоизоляционного материала.

Предметом исследования являются технические и стоимостные характеристики вышеуказанного конструктивного решения.

Цель исследования – разработка методики обоснования теплотехнических характеристик стеновых конструкций жилых зданий с использованием средств оптимизационного моделирования.

Для достижения указанной цели в работе были сформулированы следующие **задачи**:

1. Выполнить обзор и сравнительный анализ научных работ по исследуемой тематике.

2. Сформировать математическое описание процессов термического сопротивления и теплопередачи в стеновой конструкции. Выполнить вычислительные эксперименты с целью анализа зависимости теплотехнических характеристик конструкции от ее исполнения. Выявить резервы по повышению энергетической эффективности стеновой конструкции.

3. Построить аналитические модели зависимости стоимости применяемого теплоизоляционного материала в элементарном объеме от технических характеристик материала.

4. Разработать оптимизационную модель обоснования характеристик теплоизоляционного материала в составе стеновой конструкции на основе критериев изменения коэффициента теплопередачи конструкции и срока окупаемости соответствующего конструктивного решения.

5. Разработать и реализовать на практическом примере методику обоснования теплотехнических характеристик стеновых конструкций жилых зданий.

Научная новизна диссертационного исследования:

1. Сформировано математическое описание стеновой конструкции, отличительной особенностью которого является возможность учета

характеристик слоев стеновой конструкции в части взаимного расположения и технических характеристик материала в качестве варьируемых параметров, а средневзвешенной (по толщине слоев) температуры и термического сопротивления стеновой конструкции – в качестве расчетных характеристик при проведении вычислительных экспериментов.

2. Предложены аналитические модели зависимости стоимости теплоизоляционного материала в элементарном объеме от технических характеристик материала, отличительной особенностью которых является линейный характер указанной зависимости при рассмотрении технических характеристик материала в разрезе двух категорий: основных (толщина и коэффициент теплопроводности – для базовой модели; изменение коэффициента теплопередачи – для модифицированной) и дополнительных (состав характеристик предварительно формируется лицом, решающим задачу, и является одинаковым для каждой из моделей).

3. Разработана оптимизационная модель обоснования характеристик теплоизоляционного материала в составе стеновой конструкции, отличающаяся дробно-линейной структурой относительно исходных неизвестных переменных – технических характеристик материала, а также использованием в качестве целевой функции комплексного критерия, формируемого на основе нормированных критериев изменения коэффициента теплопередачи стеновой конструкции и срока окупаемости соответствующего конструктивного решения.

4. Разработана методика обоснования теплотехнических характеристик стеновых конструкций, отличительной особенностью которой является использование элементов предварительно сформированных аналитических моделей зависимости стоимости теплоизоляционного материала в составе конструкции от его технических характеристик в качестве исходных данных для построения и реализации оптимизационной модели обоснования характеристик материала, а также для последующего расчета основных технических характеристик теплоизоляционного материала на основе условия эквивалентности результатов реализации упомянутых аналитических моделей.

Теоретическая значимость диссертационного исследования заключается в развитии методов технико-экономического анализа стеновых ограждений, в разработке оптимизационных моделей обоснования характеристик экономической и энергетической эффективности строительных конструкций.

Практическая значимость полученных результатов заключается в том, что представленные в диссертации методические разработки могут быть использованы в деятельности научно-исследовательских, проектных и строительных организаций, позволяя повысить экономическую обоснованность применяемых конструктивных решений.

Результаты диссертационного исследования нашли практическое применение в АО «Строительная компания «ИРБИС» (г. Санкт-Петербург), что подтверждается соответствующим актом о внедрении.

Методология и методы исследования. Основу диссертационного исследования составляют следующие категории научных разработок:

– методические разработки в области нормативных требований к уровню теплоизоляции строительных конструкций, а также в области обоснования экономической целесообразности выполнения процедур капитального ремонта зданий с целью повышения их энергетической эффективности;

– инструментальные средства в области обоснования характеристик стеновых (ограждающих) конструкций и используемых строительных материалов в рамках конструктивных решений для повышения энергетической эффективности зданий, в области технико-экономического обоснования конструктивных решений для повышения энергетической эффективности стеновых конструкций, в области обоснования характеристик влажностного и температурного режимов стеновых (ограждающих) конструкций.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты вычислительных экспериментов, выполненных с целью анализа зависимости теплотехнических характеристик конструкции от ее исполнения. Резервы по повышению энергетической эффективности стеновой конструкции.

2. Аналитические модели зависимости стоимости применяемого теплоизоляционного материала в элементарном объеме от технических характеристик материала.

3. Оптимизационная модель обоснования характеристик теплоизоляционного материала в составе стеновой конструкции на основе критериев изменения коэффициента теплопередачи конструкции и срока окупаемости соответствующего конструктивного решения.

4. Результаты реализации на практическом примере методики обоснования теплотехнических характеристик стеновых конструкций жилых зданий с использованием средств оптимизационного моделирования.

Степень достоверности результатов исследования подтверждается современными апробированными программными средствами для разработки математических моделей, адекватностью результатов реализации моделей, использованием современных информационных технологий.

Апробация результатов работы. Основные положения диссертации и результаты исследований были представлены автором на международных и российских научно-практических конференциях в 2018-2019 гг., в том числе: международной научной конференции «Энергетика, экология и строительство» (ЕЕСЕ-2019), г. Санкт-Петербург (2019 г.); XXII школьно-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках», г. Москва (2019 г.), VI международной научной конференции «Интеграция, партнёрство и инновации в строительной науке и образовании», г. Москва (2018 г.) и др.

Публикации. По материалам диссертации опубликованы 22 работы, включая 18 статей в журналах, входящих в «Перечень периодических научных изданий, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования РФ» и базы данных Web of Science, Scopus.

Структура диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, 3 глав, заключения, списка литературы, 12 приложений. Общий объем работы – 166 страниц машинописного текста (из них 28 страниц приложений), включая 37 рисунков, 25 таблиц, список литературы из 77 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность исследуемой проблемы, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, описаны объект и предмет, методологическая база исследования, обоснована его научная новизна и практическая значимость.

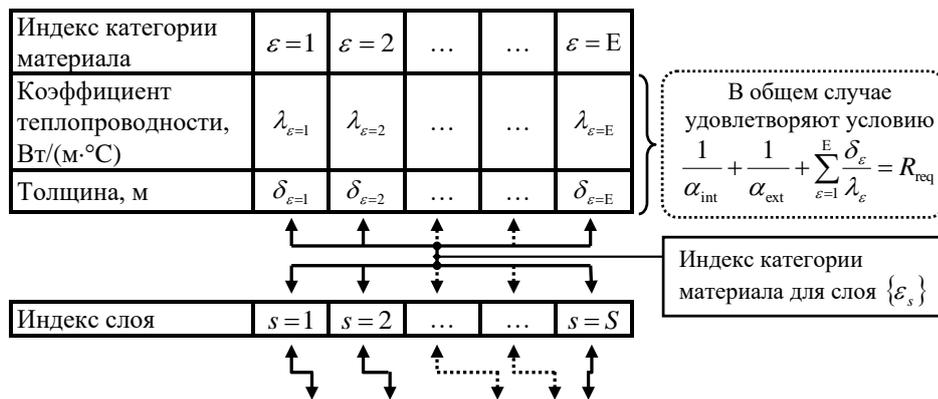
В **первой главе** приведен сравнительный анализ научных разработок в области обоснования характеристик конструктивных решений для повышения энергетической эффективности стеновых конструкций, в том числе с применением теплоизоляционных материалов. В частности, были рассмотрены работы следующих авторов: Алексейцев А.В., Горшков А.С., Жидко Е.А., Рымкевич П.П., Гагарин В.Г., Корниенко С.В., Зубарев К.П., Ватин Н.И., Ведрученко В.Р., Карпов Д.Ф., Петриченко М.Р., Ливчак В.И., Ахметов В.К., Немова Д.В., Чеснокова М.Д., Пастушков П.П., Фролькис В.А., Чеботарев В.С., Король О.А., Воробьева Ю.А., Чеснокова О.Г., Шарапов О.Н., Hamid A.A., Farsäter K., Shuo C., Guomin Z., Berger J., Mendes N., Calero M., Alameda-Hernandez E., Gori P., Guattari C., Schiavoni S., D'Alessandro F., Bianchi F., Asdrubali F., Dileep K., Kaczmarek A., Wesolowska M., Chengcheng X., Shuhong L., Karmellos M., Kiprakis A., Mavrotas G., Wei Y., Baizhan L., Hongyuan J., Ming Z.

Результаты обзора научных работ по тематике исследования подтвердили высокую актуальность проблем рационального обоснования характеристик конструктивных решений для повышения энергетической эффективности стеновых (ограждающих) конструкций посредством использования теплоизоляционных материалов и определили целесообразность формирования (на последующих этапах исследования) математического описания многослойной стеновой конструкции с целью последующего анализа взаимосвязей между техническими характеристиками указанной конструкции и показателями ее энергетической и экономической эффективности.

Вторая глава содержит описание процедуры анализа влияния характеристик конструктивных решений в области повышения энергетической эффективности стеновой конструкции в составе объекта жилищного строительства на ее теплотехнические показатели.

На начальном этапе процедуры были сформировано математическое описание стеновой конструкции, приведенное на рисунке 1.

Исходные данные

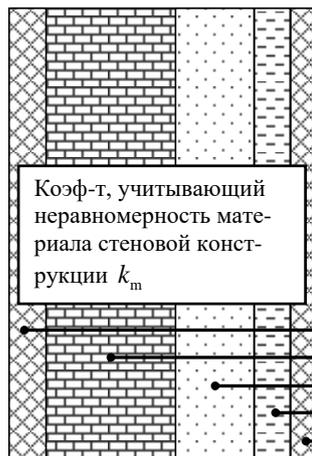


Внутренняя среда

- Температура внутренней среды t_{int} , °C
- Коэф-т теплоотдачи внутренней поверхности стеновой конструкции α_{int} , Вт/(м²·°C)
- Требуемое термическое сопротивление стеновой конструкции с утеплителем R_{req} , Вт/(м²·°C)

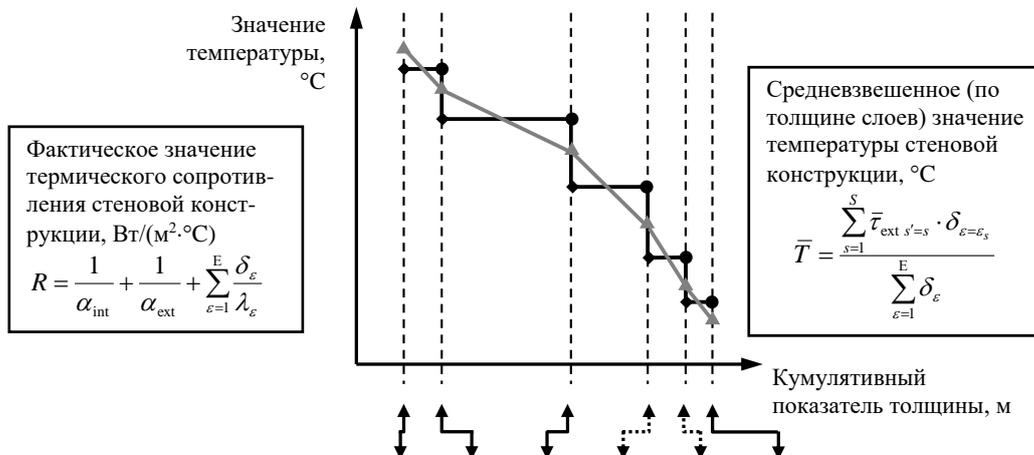
Внешняя среда

- Температура внешней среды t_{ext} , °C
- Коэф-т теплоотдачи наружной поверхности стеновой конструкции α_{ext} , Вт/(м²·°C)



- 1 – гипсовая штукатурка
- 2 – керамический полнотелый кирпич
- 3 – теплоизоляционный материал
- 4 – цементно-песчаный раствор
- 5 – керамическая плитка

Расчетные характеристики



Индекс граничной поверхности сред/слоев	$s' = 0$	$s' = 1$	$s' = 2$	$s' = S$
Кумулятивный показатель толщины, м	$\Delta_{s'=0} = 0$	$\Delta_{s'>0} = \sum_{s=1}^{s'} \delta_{\varepsilon=\varepsilon_s}$				
Температура на граничной поверхности, °C	$\bar{t}_{s'=0} = t_{\text{int}}$	$\bar{t}_{s'>0} = t_{\text{int}} - \frac{t_{\text{int}} - t_{\text{ext}}}{R} \cdot k_m \cdot \left(\frac{1}{\alpha_{\text{int}}} + \sum_{s=1}^{s'} \frac{\delta_{\varepsilon=\varepsilon_s}}{\lambda_{\varepsilon=\varepsilon_s}} \right)$				
Средняя приведенная температура на внутренней поверхности слоя $s = s' + 1$, °C	$t_{\text{int } s'} = t_{\text{int}} - \frac{t_{\text{int}} - t_{\text{ext}}}{R} \cdot \frac{k_m}{2} \cdot \left(\frac{1}{\alpha_{\text{int}}} + \sum_{s=1}^{s'+1} \frac{\delta_{\varepsilon=\varepsilon_s}}{\lambda_{\varepsilon=\varepsilon_s}} \right)$					
Средняя приведенная температура на внешней поверхности слоя $s = s'$, °C	$t_{\text{ext } s'} = t_{\text{int}} - \frac{t_{\text{int}} - t_{\text{ext}}}{R} \cdot \frac{k_m}{2} \cdot \left(\frac{1}{\alpha_{\text{int}}} + \sum_{s=1}^{s'} \frac{\delta_{\varepsilon=\varepsilon_s}}{\lambda_{\varepsilon=\varepsilon_s}} \right)$					

Рисунок 1 – Математическое описание стеновой конструкции

На следующем этапе процедуры был произведен анализ влияния расположения слоя теплоизоляционного материала в общей последовательности слоев стеновой конструкции на ее теплотехнические характеристики. Графическое описание указанных результатов в части распределения температуры по толщине стеновой конструкции представлено на рисунке 2.

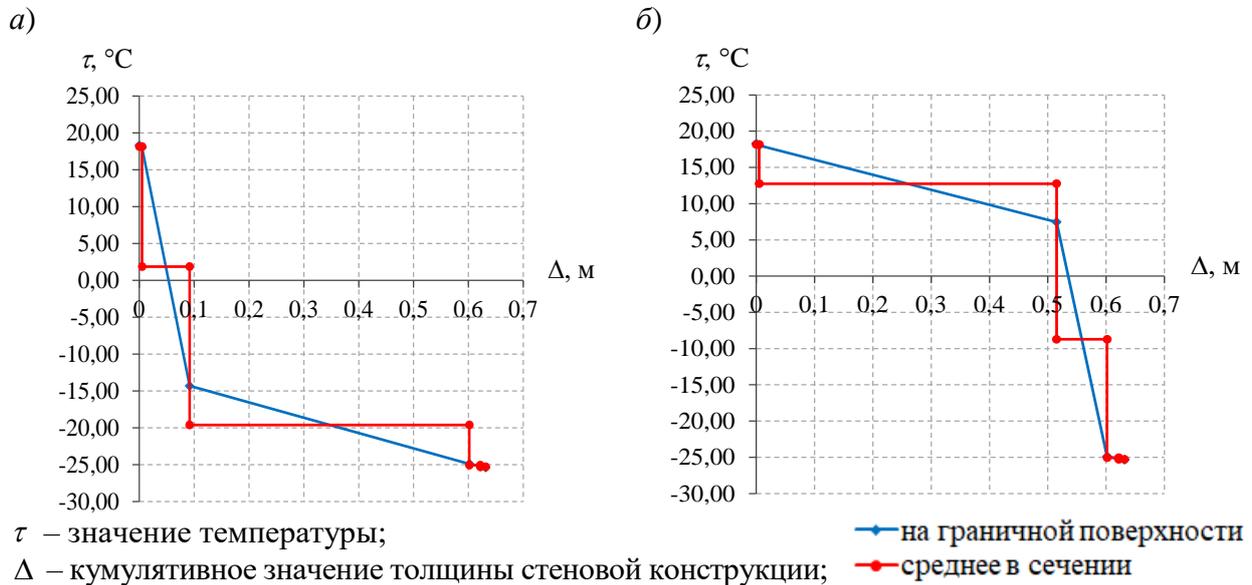
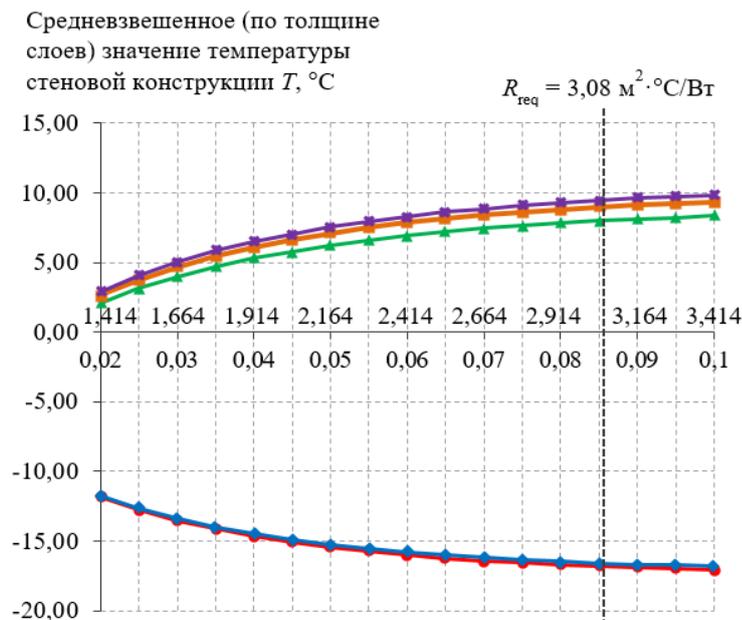


Рисунок 2 – Графики зависимости средней температуры в сечении стеновой конструкции от кумулятивного показателя ее толщины при расположении слоя теплоизоляционного материала: а) – между внутренним (гипсовая штукатурка) и несущим (керамический полнотелый кирпич) слоями; б) – между несущим (керамический полнотелый кирпич) и соединительным (цементно-песчаный раствор) слоями.

Для оценки влияния расположения слоя теплоизоляционного материала в общей последовательности слоев стеновой конструкции на ее теплотехнические характеристики был выполнен анализ устойчивости средневзвешенного (по толщине слоев) значения температуры стеновой конструкции при изменении следующих параметров конструкции: толщины слоя теплоизоляционного материала, варьируемой в заданном диапазоне значений с фиксированным шагом; расположения слоя теплоизоляционного материала в общей последовательности слоев стеновой конструкции. Графическое описание результатов выполнения вышеуказанного анализа представлено на рисунке 3.

В рамках следующего этапа был произведен анализ влияния толщины и теплопроводности слоев в составе стеновой конструкции на ее теплотехнические характеристики. Сводные данные в части средневзвешенного (по толщине слоев) значения температуры стеновой конструкции по различным вариантам расчета представлены в таблице 1.



Номер слоя		1	2	3	4	5
Индекс материала	вариант 1	3	1	2	4	5
	вариант 2	1	3	2	4	5
	вариант 3	1	2	3	4	5
	вариант 4	1	2	4	3	5
	вариант 5	1	2	4	5	3

Значение термического сопротивления стеновой конструкции R , $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$

Значение толщины слоя теплоизоляционного материала $\delta_{\epsilon} = \epsilon$, м

- 1 – гипсовая штукатурка
- 2 – керамический полнотельный кирпич
- 3 – теплоизоляционный материал
- 4 – цементно-песчаный раствор
- 5 – керамическая плитка

Рисунок 3 – Зависимость теплотехнических характеристик стеновой конструкции от расположения и толщины слоя теплоизоляционного материала

Таблица 1 – Средневзвешенное (по толщине слоев) значение температуры стеновой конструкции по всем вариантам расчета

Номер варианта комбинации значений толщины слоев	Зависимость значения толщины слоя от его индекса	Значение средневзвешенной (по толщине слоев) температуры стеновой конструкции для варианта (l) комбинации значений коэффициента теплопроводности слоев		
		1	2	3
		Исходные значения	Исходные значения, ранжированные по возрастанию	Исходные значения, ранжированные по убыванию
k	-	$\bar{T}_{kl=1}$	$\bar{T}_{kl=2}$	$\bar{T}_{kl=3}$
-	-	°C	°C	°C
1	Отсутствует (используются исходные значения)	8,1	-7,0	1,6
2	Отсутствует (идентичность слоев по толщине)	-4,8	-17,4	10,6
3	Возрастающая линейная зависимость	-9,5	-17,3	9,6
4	Возрастающая степенная зависимость	-15,2	-11,9	7,1
5	Возрастающая логарифмическая зависимость	-12,4	-9,9	8,9
6	Возрастающая экспоненциальная зависимость	-15,9	-10,2	3,9
7	Убывающая линейная зависимость	-0,2	-16,2	9,9
8	Убывающая степенная зависимость	1,1	-9,4	4,5
9	Убывающая логарифмическая зависимость	1,0	-14,9	9,4
10	Убывающая экспоненциальная зависимость	2,2	-10,2	1,01

Третья глава содержит описание инструментальных средств, использование которых обеспечит полноценный совместный учет как теплотехнических характеристик, так и показателей экономической целесообразности конструктивных решений в области повышения энергетической эффективности стеновых (ограждающих) конструкций посредством применения теплоизоляционных материалов. К указанным инструментальным средствам относятся следующие:

- аналитические модели зависимости стоимости теплоизоляционного материала в элементарном объеме от технических характеристик материала (необходимы для обеспечения адекватных результатов применения средств оптимизационного моделирования);

- оптимизационная модель обоснования характеристик теплоизоляционного материала в составе стеновой конструкции на основе критериев изменения коэффициента теплопередачи и срока окупаемости соответствующего конструктивного решения;

- методика обоснования теплотехнических характеристик стеновых конструкций жилых зданий с использованием средств оптимизационного моделирования (представляет собой формализованное описание многоэтапного процесса решения соответствующей задачи).

Блок-схема процедуры формирования аналитических моделей зависимости стоимости теплоизоляционного материала в элементарном объеме от технических характеристик материала представлена на рисунке 4. Важно отметить, что процедура реализуется на основе предварительно сформированного набора образцов теплоизоляционного материала с использованием линейных многофакторных регрессионных моделей.

Процедура формирования оптимизационной модели обоснования характеристик теплоизоляционного материала в составе стеновой конструкции на основе соответствующих компонент – исходных данных, неизвестных переменных и расчетных характеристик – представлена в виде блок-схемы на рисунке 5.

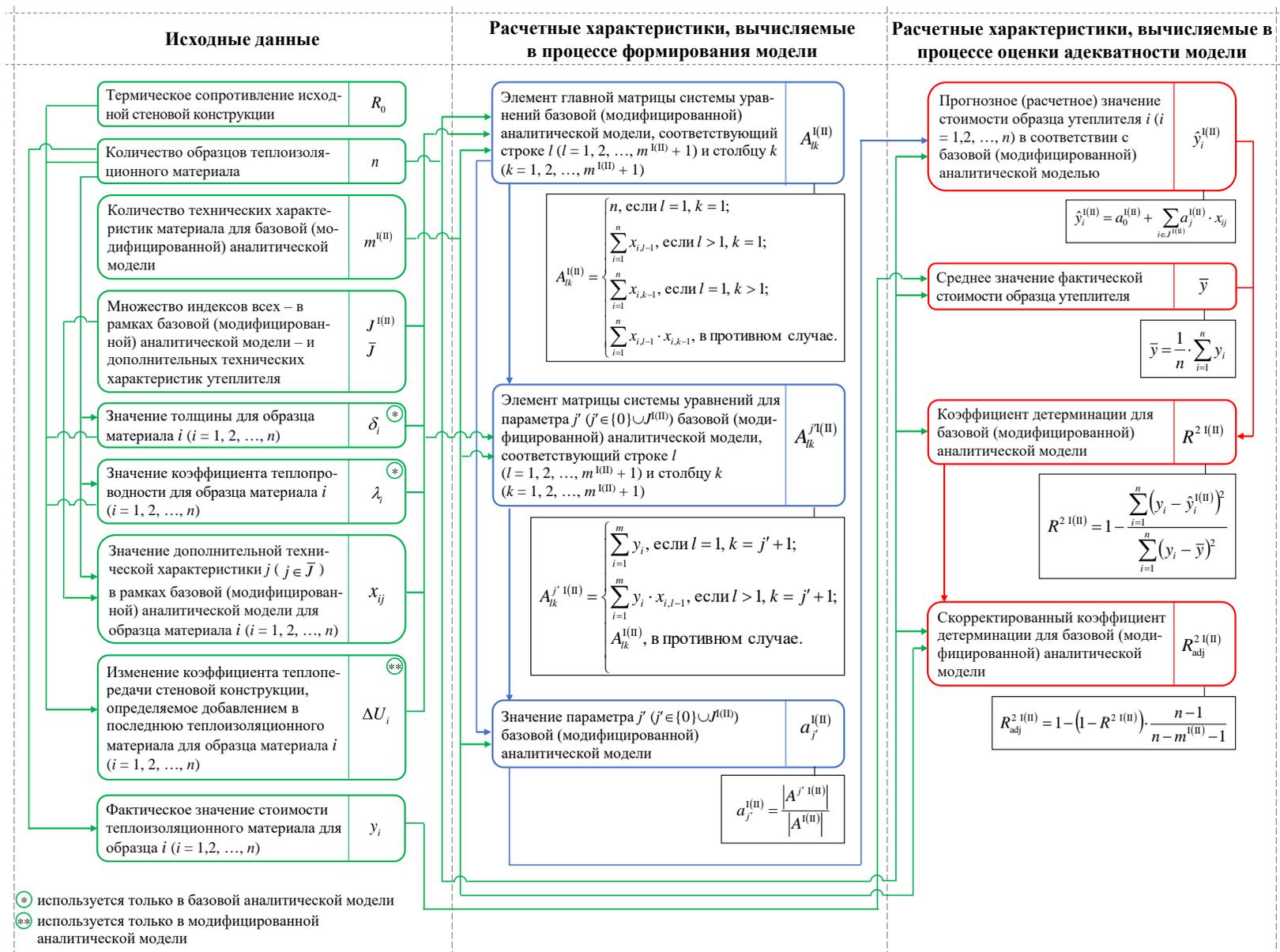


Рисунок 4 – Аналитические модели зависимости стоимости утеплителя от его технических характеристик

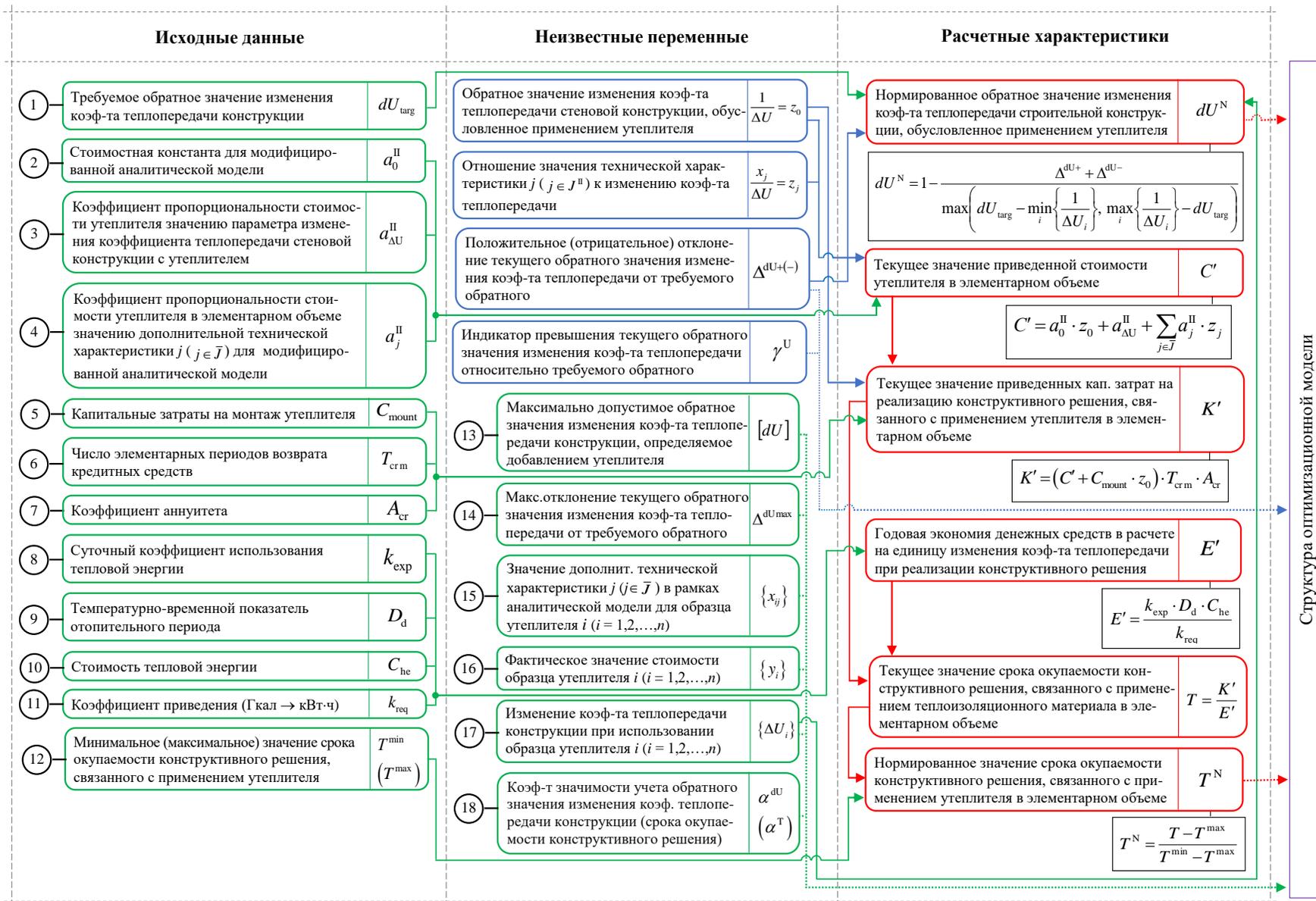


Рисунок 5 – Исходные данные, неизвестные переменные и расчетные характеристики оптимизационной модели

Целевая функция оптимизационной модели определяется выражением:

$$\alpha^{\text{dU}} \cdot \left(1 - \frac{\Delta^{\text{dU}+} + \Delta^{\text{dU}-}}{\max \left(dU_{\text{targ}} - \min_i \left\{ \frac{1}{\Delta U_i} \right\}, \max_i \left\{ \frac{1}{\Delta U_i} \right\} - dU_{\text{targ}} \right)} \right) + \alpha^{\text{T}} \cdot \left(\frac{\left(a_0^{\text{II}} \cdot z_0 + a_{\Delta U}^{\text{II}} + \sum_{j \in \bar{J}} a_j^{\text{II}} \cdot z_j + C_{\text{mount}} \cdot z_0 \right) \cdot T_{\text{crm}} \cdot A_{\text{cr}} \cdot k_{\text{req}}}{k_{\text{exp}} \cdot D_d \cdot C_{\text{he}} \cdot (T^{\text{min}} - T^{\text{max}})} - \frac{T^{\text{max}}}{T^{\text{min}} - T^{\text{max}}} \right) \rightarrow \max; \quad (1)$$

Прямые ограничения на неизвестные переменные имеют вид:

$$\min_i \left\{ \frac{1}{\Delta U_i} \right\} \leq z_0 \leq \max_i \left\{ \frac{1}{\Delta U_i} \right\}; \quad (2)$$

$$z_0 \leq [dU]; \quad (3)$$

$$\min_i \left\{ \frac{x_{ij}}{\Delta U_i} \right\} \leq z_j \leq \max_i \left\{ \frac{x_{ij}}{\Delta U_i} \right\}, \quad j \in \bar{J}; \quad (4)$$

$$\gamma^{\text{U}} \in \{0; 1\}; \quad (5)$$

$$0 \leq \Delta^{\text{dU}+} \leq \Delta^{\text{dU max}}; \quad (6)$$

$$0 \leq \Delta^{\text{dU}-} \leq \Delta^{\text{dU max}}; \quad (7)$$

Непрямые ограничения, описывающие взаимосвязи между отдельными неизвестными переменными, определяются выражениями:

$$\min_i \{x_{ij}\} \cdot z_0 \leq z_j \leq \max_i \{x_{ij}\} \cdot z_0, \quad j \in \bar{J}; \quad (8)$$

$$\Delta^{\text{dU}+} \leq \Delta^{\text{dU max}} \cdot \gamma^{\text{U}}; \quad (9)$$

$$\Delta^{\text{dU}-} \leq \Delta^{\text{dU max}} \cdot (1 - \gamma^{\text{U}}); \quad (10)$$

$$z_0 - dU_{\text{targ}} = \Delta^{\text{dU}+} - \Delta^{\text{dU}-}; \quad (11)$$

$$\min_i \left\{ \frac{y_i}{\Delta U_i} \right\} \leq a_0^{\text{II}} \cdot z_0 + a_{\Delta U}^{\text{II}} + \sum_{j \in \bar{J}} a_j^{\text{II}} \cdot z_j \leq \max_i \left\{ \frac{y_i}{\Delta U_i} \right\}; \quad (12)$$

Непрямые ограничения, определяющие границы изменения нормированных значений критериев, описываются выражениями:

$$0 \leq 1 - \frac{\Delta^{\text{dU}+} + \Delta^{\text{dU}-}}{\max \left(dU_{\text{targ}} - \min_i \left\{ \frac{1}{\Delta U_i} \right\}, \max_i \left\{ \frac{1}{\Delta U_i} \right\} - dU_{\text{targ}} \right)} \leq 1; \quad (13)$$

$$0 \leq \frac{\left(a_0^{\text{II}} \cdot z_0 + a_{\Delta U}^{\text{II}} + \sum_{j \in \bar{J}} a_j^{\text{II}} \cdot z_j + C_{\text{mount}} \cdot z_0 \right) \cdot T_{\text{crm}} \cdot A_{\text{cr}} \cdot k_{\text{req}}}{k_{\text{exp}} \cdot D_d \cdot C_{\text{he}} \cdot (T^{\text{min}} - T^{\text{max}})} - \frac{T^{\text{max}}}{T^{\text{min}} - T^{\text{max}}} \leq 1. \quad (14)$$

Как видно из выражений (1)–(14), разработанная оптимизационная модель является линейной относительно неизвестных переменных и потому может быть эффективно реализована с использованием современных сред оптимизационного моделирования («Microsoft Excel», «Mathcad», «Matlab» и

др.), что позволяет сделать вывод о высокой практической значимости разработанного инструментального средства.

Важно отметить, что результаты реализации оптимизационной модели непосредственно не описывают такие характеристики, как толщина δ и коэффициент теплопроводности λ (заключенные в неизвестной переменной dU), и потому не могут быть использованы для обоснования характеристик образца теплоизоляционного материала.

Для определения оптимальных значений толщины δ^{opt} и коэффициента теплопроводности λ^{opt} теплоизоляционного материала на основе результатов реализации оптимизационной модели было предложено использовать систему уравнений вида:

$$\begin{cases} a_0^I + a_\delta^I \cdot \delta^{\text{opt}} + a_\lambda^I \cdot \lambda^{\text{opt}} + \sum_{j \in \bar{J}} a_j^I \cdot x_j^{\text{opt}} = a_0^{\text{II}} + a_{\Delta U}^{\text{II}} \cdot \Delta U^{\text{opt}} + \sum_{j \in \bar{J}} a_j^{\text{II}} \cdot x_j^{\text{opt}}; \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} \frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_0 + \frac{\delta^{\text{opt}}}{\lambda^{\text{opt}}}} = \Delta U^{\text{opt}}, \end{cases} \quad (16)$$

где ΔU^{opt} , $\{x_j^{\text{opt}}\}$ – оптимальные значения соответственно изменения коэффициента теплопередачи стеновой конструкции (изменение определяется добавлением утеплителя) и дополнительных технических характеристик утеплителя, определяемые на основе результатов реализации оптимизационной модели с использованием следующих выражений:

$$\Delta U^{\text{opt}} = \frac{1}{z_0^{\text{opt}}}; \quad (17)$$

$$x_j^{\text{opt}} = \frac{z_j^{\text{opt}}}{z_0^{\text{opt}}}, \quad j \in \bar{J}. \quad (18)$$

Формулы для вычисления оптимальных значений толщины δ^{opt} и коэффициента теплопроводности λ^{opt} , полученные подстановкой формул (17) и (18) в выражения (15) и (16) с последующим приведением подобных, имеют вид:

$$\lambda^{\text{opt}} = \frac{(a_0^{\text{II}} - a_0^I) \cdot z_0^{\text{opt}} + a_{\Delta U}^{\text{II}} + \sum_{j \in \bar{J}} (a_j^{\text{II}} - a_j^I) \cdot z_j^{\text{opt}}}{z_0^{\text{opt}} \cdot \left(a_\delta^I \cdot \frac{R_0^2}{z_0^{\text{opt}} - R_0} + a_\lambda^I \right)}; \quad (19)$$

$$\delta^{\text{opt}} = \frac{(a_0^{\text{II}} - a_0^I) \cdot z_0^{\text{opt}} + a_{\Delta U}^{\text{II}} + \sum_{j \in \bar{J}} (a_j^{\text{II}} - a_j^I) \cdot z_j^{\text{opt}}}{z_0^{\text{opt}} \cdot \left(a_\delta^I + a_\lambda^I \cdot \frac{z_0^{\text{opt}} - R_0}{R_0^2} \right)}; \quad (20)$$

где z_0^{opt} , $\{z_j^{\text{opt}}\}$ – оптимальные значения неизвестных переменных оптимизационной модели.

Блок-схема методики обоснования теплотехнических характеристик стеновых конструкций жилых зданий представлена на рисунке 6.

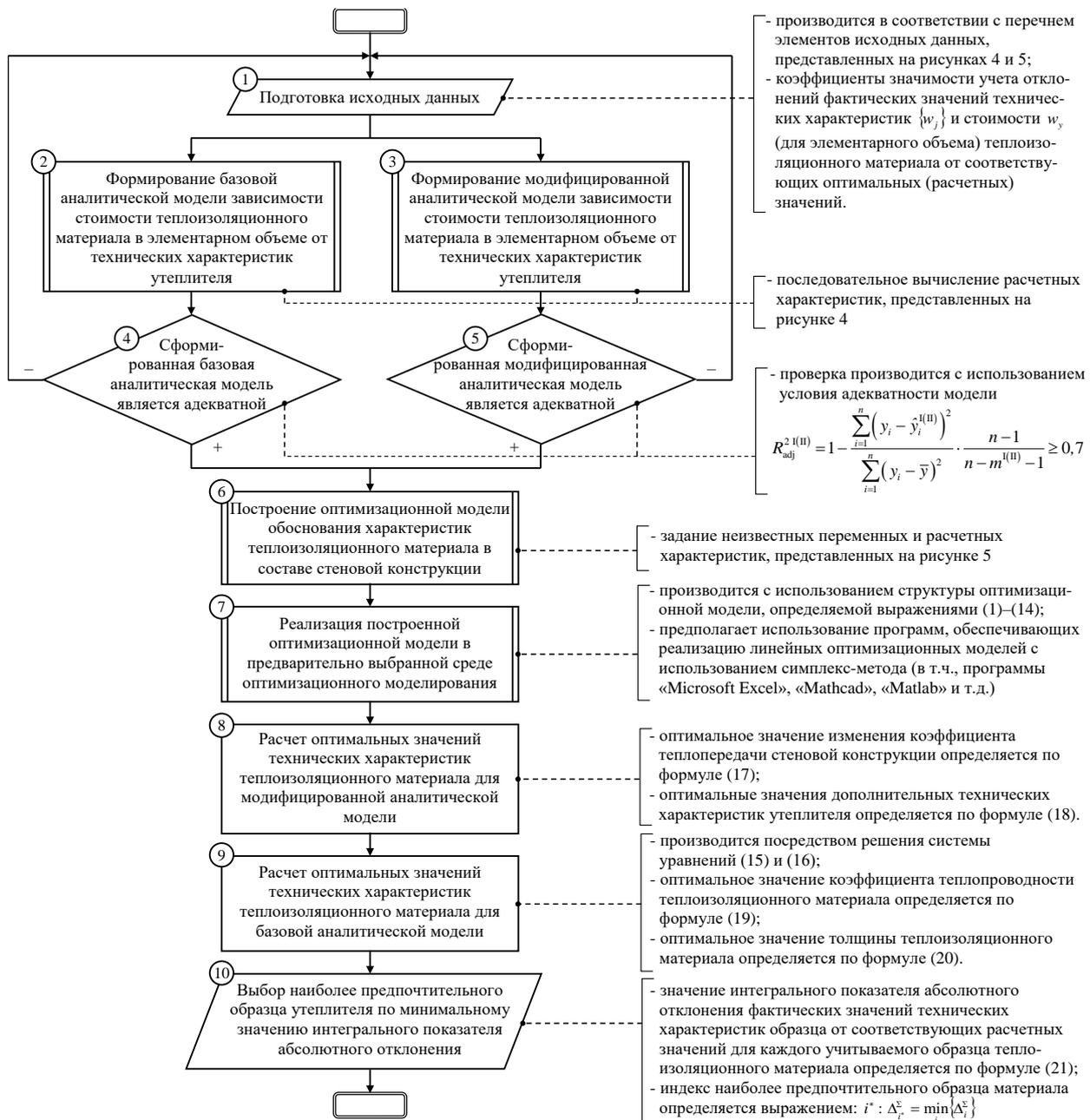


Рисунок 6 – Блок-схема методики обоснования теплотехнических характеристик стеновых конструкций жилых зданий

Для оценки практической значимости разработанной методики была произведена ее реализация на практическом примере – обосновании характеристик конструктивного решения, предполагающего использование стандартного образца теплоизоляционного материала для повышения энергетической эффективности стеновой конструкции в составе объекта жилищного строительства.

Подготовленные на начальном этапе реализации методики (блок 1 схемы на рисунке 6) исходные данные включали в себя информацию о 100 образцах утеплителя в части стоимости элементарного объема (площадью 1 м^2), а также базовых и дополнительных технических характеристик (в соответствии с предложенными аналитическими моделями). В качестве

дополнительных технических характеристик теплоизоляционного материала при решении задачи рассматривались следующие: средняя плотность, водопоглощение по объему за 24 ч., группа горючести.

Расчеты были выполнены в программе «Microsoft Excel» (с использованием надстройки «Поиск решения» для построения и реализации оптимизационной модели). Соответствующие результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты реализации методики на практическом примере в части аналитических и оптимизационной моделей (рисунок 6, блоки 2–9)

№ п.п.*	Наименование параметра / расчетной характеристики	Ед. изм.	Значение элемента аналитической модели		Оптимальное значение**	Наилучшее (ближайшее к оптимальному) значение
			базовая модель	модифицированная модель		
k	-	-	$a_k^I a_0^I$	$a_k^{II} a_0^{II}$	$x_k^{opt} y^{opt}$	$x_k'^{opt} y'^{opt}$
-	-	ЕИ	руб./ЕИ руб.	руб./ЕИ руб.	ЕИ руб.	ЕИ руб.
1	Толщина	м	1684,28	-	0,082	0,1
2	Коэффициент теплопроводности	$\frac{Вт}{м \cdot ^\circ C}$	-1162,75	-	0,04	0,04
3	Изменение коэф-та теплопередачи	$\frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C}$	-	549,77	-	-
4	Средняя плотность	кг/м ³	1,78	1,77	10,5	11
5	Водопоглощение по объему за 24 ч.	%	3,48	5,07	0,4	1
6	Группа горючести	-	58,56	59,61	1	1
-	Стоимостная константа	руб.	-65,95	-310,85	-	
-	Удельная стоимость (в расчете на 1 м ²)	руб.	-	-	103,21	113

Примечание:

* используется сквозная индексация технических характеристик теплоизоляционного материала для более удобного отображения (не является идентичной индексации технических характеристик, представленной на рисунке 4);

** оптимальные значения технических характеристик с индексами $k = 3, 4, 5, 6$ получены на основе результатов реализации оптимизационной модели (блок 8 схемы на рисунке 6); оптимальные значения характеристик с индексами $k = 1, 2$ получены, исходя из условия эквивалентности результатов реализации аналитических моделей (блок 9 схемы на рисунке 6).

На основе полученных результатов в рамках последнего этапа методики (блок 10 схемы на рисунке 6) из исходной выборки образцов теплоизоляционного материала был выбран наиболее предпочтительный вариант, соответствующий минимальному значению интегрального показателя абсолютного отклонения (значений технических характеристик образца от оптимальных расчетных), предварительного вычисленного для каждого образца в составе выборки по формуле:

$$\Delta_i^{\Sigma} = \sum_{j \in J^1} w_j \cdot |x_{ij} - x_j^{\text{opt}}| + w_y \cdot |y_i - \hat{y}_i^1(\{x_j^{\text{opt}}\})| = \sum_{j \in J^1} w_j \cdot |x_{ij} - x_j^{\text{opt}}| + w_y \cdot \left| y_i - a_0^1 - \sum_{j \in J^1} a_j^1 \cdot x_j^{\text{opt}} \right|, \quad (21)$$

где w_j , w_y – долевые коэффициенты значимости учета соответственно технической характеристики j ($j \in J^1$) и стоимости утеплителя в элементарном объеме – принимались одинаковыми при решении задачи. Полученные результаты представлены в таблице 2.

Высокие значения показателей адекватности сформированных аналитических моделей, а также наличие области допустимых решений и идентификация оптимального решения в процессе реализации оптимизационной модели позволили сделать вывод о корректной структуре разработанной методики, ее высокой практической значимости и, как следствие, возможности использования методики для широкого спектра подобных прикладных задач, связанных с обоснованием технических характеристик теплоизоляционных материалов, используемых в составе конструктивных решений при возведении объектов гражданского и промышленного строительства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках проведенного исследования получены следующие результаты:

1. Обоснована недостаточная степень проработанности вопросов обоснования характеристик конструктивных решений в области повышения энергетической эффективности стеновых (ограждающих) конструкций посредством применения теплоизоляционных материалов.

2. Сформированное математическое описание многослойной стеновой конструкции позволило провести вычислительные эксперименты в рамках анализа влияния характеристик конструктивных решений в области повышения энергетической эффективности стеновой конструкции на ее теплотехнические показатели. По результатам указанных экспериментов определено, что оптимальным расположением теплоизоляционного материала является его монтаж снаружи помещения. В этом случае средневзвешенная температура конструкции варьируется от 2,1 °С до 9,8 °С (при толщине слоя утеплителя от 0,02 м до 0,1 м), тогда как при монтаже утеплителя внутри помещения температура будет от минус 17 °С до минус 11,8 °С. Предпочтительными комбинациями значений толщины и коэффициента теплопроводности являются конструкции с монотонно убывающим по слоям (от внутренней среды к внешней) значением коэффициента теплопроводности.

3. Предложенные аналитические модели зависимости стоимости теплоизоляционного материала в элементарном объеме от технических характеристик материала обеспечивают высокую адекватность соответствующих прогнозных расчетов, поскольку при реализации результатов исследования на практическом примере – для оценки вышеупомянутой зависимости для выборки образцов утеплителей – значения скорректированных коэффициентов детерминации оказались равными $R_{\text{adj}}^{2 \text{ I}} = 0,897$ и $R_{\text{adj}}^{2 \text{ II}} = 0,923$ для базовой и модифицированной модели соответственно.

4. Разработанная оптимизационная модель обоснования характеристик теплоизоляционного материала в составе стеновой конструкции обладает высокой практической значимостью, поскольку обеспечивает одновременный учет критериев изменения коэффициента теплопередачи стеновой конструкции и срока окупаемости соответствующего конструктивного решения при линейной структуре целевой функции и непрямых ограничений (относительно неизвестных переменных), что, в свою очередь, определяет возможность эффективной реализации модели в современных программных средах оптимизационного моделирования, в том числе, программах «Microsoft Excel», «Mathcad», «Matlab» и др. В частности, при реализации результатов исследования на практическом примере были определены оптимальные значения характеристик теплоизоляционного материала в пределах допустимых значений, соответствующее значение термического сопротивления стеновой конструкции оказалось равным $2,006 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$, значение расчетного срока окупаемости – 18,8 года.

5. Разработанная методика обоснования теплотехнических характеристик стеновых конструкций жилых зданий с использованием средств оптимизационного моделирования, базирующаяся на всех вышеперечисленных результатах исследования, обеспечивает определение наиболее предпочтительного образца теплоизоляционного материала по минимальному значению интегрального показателя абсолютного отклонения характеристик образца от предварительно рассчитанных оптимальных значений, а следовательно, в общем случае и экономию денежных средств относительно подбора образца материала исходя только из требуемого интервала значений термического сопротивления стеновой конструкции. При реализации методики на практическом примере значение вышеупомянутой экономии денежных средств (относительно среднего арифметического значения стоимости материала для исходной выборки образцов) составило 26,15%.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Работы, опубликованные в изданиях из Перечня периодических научных изданий, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования РФ:

1 Гамаюнова, О.С. Обоснование стоимости утеплителей от их теплофизических характеристик / О.С. Гамаюнова // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2019. – № 1 (76). – С. 19-29.

2 Гамаюнова, О.С. Модель и методика принятия рационального решения по обеспечению энергоэффективности домов старого фонда военных городков / О.С. Гамаюнова // Труды Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского. – 2019. – № 669. –С. 18-28.

3 Гамаюнова, О.С. Выбор оптимального варианта утепления жилых домов в различных климатических зонах / О.С. Гамаюнова // Строительство и техногенная безопасность. – 2019. – № 16 (68). – С. 89-97.

4 Мусорина, Т.А. Обоснование конструктивных мероприятий по увеличению энергоэффективности стеновых ограждений / Т.А. Мусорина, О.С. Гамаюнова, М.Р. Петриченко // Вестник МГСУ. – 2017. – Т. 12. – № 11 (110). – С. 1269-1277.

5 Мусорина, Т.А. Тепловой режим ограждающих конструкций высотных зданий / Т.А. Мусорина, О.С. Гамаюнова, М.Р. Петриченко // Вестник МГСУ. – 2018. – Т. 13. – № 8 (119). – С. 935-943.

6 Ватин, Н.И. Проведение энергоаудита детских садов с целью повышения энергоэффективности / Н.И. Ватин, О.С. Гамаюнова, Д.В. Немова // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2014. – № 9 (24). – С. 71-83.

Работы, опубликованные в научных изданиях, входящих в международные реферативные базы данных (Web of Science, Scopus):

1 Gamayunova, O. Energy audit and energy efficiency of modular military towns / O. Gamayunova, A. Radaev, M. Petrichenko, N. Shushunova // E3S Web of Conferences. – 2019. – 01088.

2 Gamayunova, O. The increase in energy efficiency of residential buildings of military towns / O. Gamayunova, A. Radaev, M. Petrichenko, E. Dmitrieva // E3S Web of Conferences. – 2019. – 02144.

3 Gamayunova, O. Feasibility study of the insulation of the enclosing walls of high-rise buildings / O. Gamayunova, M. Petrichenko, T. Musorina, E. Gumerova // MATEC Web of Conferences. – 2018. – 06006.

4 Gamayunova, O. Warming of panel houses in various climatic zones / O. Gamayunova, T. Musorina, M. Petrichenko, V. Goremikins // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2020. – Т. 70. – Pp. 253-263.

5 Gamayunova, O.S. The procedure for determination of the dependence of the cost of insulation materials on their thermophysical characteristics / O.S. Gamayunova, A.E. Radaev, M.R. Petrichenko // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – 012018.

6 Gamayunova, O. Predictive model of the dependence of the cost of insulation on thermal characteristics / O. Gamayunova, A. Radaev, M. Petrichenko, R. Bogdanivics // E3S Web of Conferences. – 2019. – 04018.

7 Gamayunova, O. Humidity distributions in multilayered walls of high-rise buildings / O. Gamayunova, T. Musorina, A.D. Ishkov // E3S Web of Conferences. – 2018. – 02045.

8 Gumerova, E. Energy efficiency upgrading of enclosing structures of mass housing of the Soviet Union / E. Gumerova, O. Gamayunova, T. Meshcheryakova // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2017. – Т. 692. – Pp. 432-439.

9 Musorina, T.A. Boundary layer of the wall temperature field / T.A. Musorina, O.S. Gamayunova, M.R. Petrichenko, E. Soloveva // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2020. – Т. 1116. – Pp. 429-437.

10 Gumerova, E. The optimal decision of insulation in cladding structures for energy efficient buildings / E. Gumerova, O. Gamayunova, L. Shilova // MATEC Web of Conferences. – 2017. – 06020.

11 Vatin, N. An energy audit of kindergartens to improve their energy efficiency / N. Vatin, O. Gamayunova, D. Nemova // Advances in Civil Engineering and Building Materials. – 2015. – Pp. 305-308.

12 Gamayunova, O. Thermotechnical calculation of enclosing structures of a standard type residential building / O. Gamayunova, M. Petrichenko, A. Mottaeva // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – 1614(1). – 012066.

Публикации в других изданиях:

1 Гамаюнова, О.С. Энергоаудит и энергоэффективность модульных военных городков / О.С. Гамаюнова, А.Е. Радаев // Проблемы обеспечения функционирования и развития наземной инфраструктуры комплексов систем вооружения. Материалы III всероссийской научно-технической конференции. – 2019. – С. 63-67.

2 Гамаюнова, О.С. Повышение энергоэффективности старого жилого фонда / О.С. Гамаюнова, Э.И. Гумерова // В сборнике: Неделя науки СПбПУ. Материалы научной конференции с международным участием. Инженерно-строительный институт. – 2018. – С. 342-344.

3 Мусорина, Т.А. Термическое сопротивление однородного стенового ограждения / Т.А. Мусорина, Д.Д. Заборова, О.С. Гамаюнова, М.Р. Петриченко // В сборнике: Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках. материалы XXII Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А. И. Леонтьева. – 2019. – С. 209-211.

4 Гумерова, Э.И. Анализ энергоэффективности стеновых конструкций, применяемых в Санкт-Петербурге / Э.И. Гумерова, О.С. Гамаюнова // В сборнике: Неделя науки СПбПУ. Материалы научной конференции с международным участием. Инженерно-строительный институт. – 2018. – С. 345-347.