

Research Article

Received: October 18, 2021

Accepted: November 30, 2021

Published: December 06, 2021

ISSN 2658-5553

Optimization of energy efficiency design characteristics for construction projects

Radaev, Anton Evgenievich¹ 
Gamayunova, Olga Sergeevna^{1*} 
Bardina, Galina Andreevna¹ 

¹ Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg, Russian Federation;
tw-inc@yandex.ru (R.A.E.); gamayunova@inbox.ru (G.O.S.); bardina_ga@spbstu.ru (B.G.A.)
Correspondence:* email gamayunova@inbox.ru; contact phone [+79219658825](tel:+79219658825)

Keywords:

Residential construction object; Enclosing structure; Thermal resistance; Payback period, Optimization model; Energy efficiency; Thermal insulation material

Abstract:

The organization of construction production determines the high importance of solving problems related to energy efficiency in the development of projects both in the field of construction of new buildings and in the area of reconstruction of existing residential facilities. This circumstance, combined with the limitations of existing scientific developments, determined the practicality of researching to develop tools for determining the characteristics of a constructive solution in the field of energy efficiency of a housing construction object. At the initial stages of the study, a review and comparative analysis of existing scientific developments were carried out, the corresponding vital shortcomings were identified. As part of the intermediate stages of the study, the structure of the procedure has been developed, which involves the sequential formation of analytical models describing the dependence of the value of the specific cost of the thermal insulation material on the importance of the technical characteristics of the material within each individual enclosing structure, followed by the creation and implementation of a fractional-linear optimization model to obtain preliminary (mathematically ideal) values of the technical characteristics of the material, as well as models of integer linear optimization for the formation of the composition of the most preferred samples (variants) of the material.

1 Introduction

В строительной отрасли, характеризующейся усложнением структуры проектов жилищного строительства, а также ужесточением требований в части сроков и качества возводимых зданий, особую значимость приобретают вопросы обеспечения энергетической эффективности объектов строительства посредством рационального обоснования состава ограждающих конструкций. Указанное обстоятельство обусловлено не только значительными объемами строительства новых зданий, но также и большим количеством существующих объектов строительства, имеющих большой срок эксплуатации и не отвечающих современным требованиям в области энергетической эффективности, предусмотренным нормативными документами. При этом результаты предварительного обзора научных работ свидетельствуют об отсутствии инструментальных средств, обеспечивающих формирование конструктивных решений в области обеспечения энергетической эффективности объекта жилищного строительства, удовлетворяющих не только нормативным требованиям, но и являющихся при этом экономически целесообразными. Вышеописанные особенности определили необходимость проведения исследования, целью которого является разработка инструментальных средств для обоснования



характеристик конструктивного решения в области обеспечения энергетической эффективности объекта жилищного строительства с использованием средств оптимизационного моделирования.

В соответствии с вышеуказанной целью исследования были сформулированы задачи:

1. Выполнить обзор и сравнительный анализ научных работ в области обоснования характеристик теплоизоляционных материалов в составе ограждающих конструкций объектов жилищного строительства.

2. Разработать методику обоснования характеристик конструктивного решения в области обеспечения энергетической эффективности объекта жилищного строительства с использованием средств оптимизационного моделирования.

Объектом исследования являлся проектируемый или существующий объект жилищного строительства, по отношению к которому формируется конструктивное решение в области обеспечения энергетической эффективности посредством использования теплоизоляционных материалов в составе ограждающих конструкций.

Предметом исследования являлись характеристики вышеупомянутого конструктивного решения в части технических характеристик теплоизоляционных материалов, а также показателей энергетической эффективности и экономической целесообразности.

На начальных этапах исследования был произведен обзор и анализ научных работ в области обоснования характеристик теплоизоляционных материалов в составе ограждающих конструкций объектов жилищного строительства. По результатам выполнения вышеупомянутых процедур сделаны следующие выводы:

1. Достаточно большое количество работ содержит результаты расчета отдельных реально существующих ограждающих конструкций при различных вариантах решений в области повышения энергетической эффективности конструкций и потому имеет исключительно прикладной характер [1]–[12]. При этом учет соответствующих практических рекомендаций по отношению к иным реально существующим ограждающим конструкциям в общем случае требует дополнительного обоснования.

2. Отдельные разработки базируются на использовании аналитических (в том числе метода анализа иерархий) [13][14] и графо-аналитических [15] методик, для обоснования характеристик теплоизоляционного материала в составе ограждающей конструкции. Основными недостатками указанных разработок являются следующие:

- отсутствие объективного и полноценного учета показателей энергетической эффективности и экономической целесообразности при оценке эффективности конструктивного решения.
- высокая трудоемкость реализации при отсутствии возможности применения процедур оптимизационного или имитационного моделирования.

3. Отдельная категория разработок предполагает использование генетических алгоритмов [16][17] и нейронных сетей [18] для обоснования характеристик конструктивных решений в области обеспечения энергетической эффективности ограждающих конструкций. Основными недостатками вышеописанных разработок являются следующие:

- отсутствие учета экономии эксплуатационных затрат на отопление объекта строительства при использовании теплоизоляционных материалов в составе ограждающих конструкций;
- зависимость результатов работы вычислительных алгоритмов от начальных значений неизвестных переменных и, как следствие, необходимость обоснования упомянутых значений переменных для обеспечения приемлемой адекватности.

4. Имеются разработки, представленные в виде научных статей [19][20], а также диссертации [21], предполагающие обоснование характеристик теплоизоляционного материала с использованием аналитических моделей зависимости стоимости упомянутого материала в элементарном объеме от его технических характеристик, а также мелко-линейной оптимизационной модели обоснования характеристик утеплителя. Указанные разработки не имеют недостатков, перечисленных в предшествующих пунктах выводов (что позволяет рассматривать данные разработки как перспективные), но, тем не менее, характеризуются определенными особенностями, оказывающими негативное влияние на практическую значимость разработок:

- предлагаемые расчетные процедуры относятся к элементарному объему теплоизоляционного материала, соответствующему 1 м² стеновой конструкции; таким образом, использование разработок в практике проектирования объектов жилищного строительства будет характеризоваться трудностью учета различных категорий ограждающих конструкций (стены, полы, покрытия и т.д.), их площади и конфигурации расположения светопрозрачных элементов.



- обоснование оптимальных значений технических характеристик теплоизоляционного материала производится при условии эквивалентной адекватности двух аналитических моделей зависимости стоимости утеплителя в элементарном объеме от технических характеристик материала – базовой и модифицированной моделей, каждая из которых в общем случае имеет некоторую погрешность прогнозирования.

Таким образом, результаты, полученные в процессе обзора и анализа научных работ по тематике исследования, свидетельствуют об ограниченности существующих инструментальных средств, ключевым недостатком которых является отсутствие объективного учета взаимосвязи значений технических характеристик теплоизоляционных материалов (в составе комбинации ограждающих конструкций в рамках объекта жилищного строительства) со значениями показателей энергетической эффективности и экономической целесообразности конструктивного решения. Данное обстоятельство определило необходимость разработки в рамках дальнейшего этапа исследования методики обоснования характеристик конструктивного решения в области обеспечения энергетической эффективности объекта жилищного строительства с использованием средств оптимизационного моделирования.

2 Materials and Methods

При формировании основных результатов исследования были использованы следующие инструментальные средства:

– процедура многофакторной линейной регрессии, реализуемая по отношению к выборкам образцов теплоизоляционного материала для формирования параметров аналитической модели зависимости затрат на приобретение теплоизоляционного материала в расчете на единицу площади ограждающей конструкции в составе объекта жилищного строительства от технических характеристик материала на основе метода наименьших квадратов¹;

– методика реализации моделей дробно-линейной оптимизации, предполагающая приведение первоначальной модели к линейному виду посредством замены исходных переменных на так называемые модифицированные, представляющие собой соотношения исходных переменных и величины знаменателя целевой функции модели, с последующим использованием симплекс-метода для реализации получаемых линейных оптимизационных моделей. Обеспечиваемая при этом возможность определения единственного оптимального решения является наиболее важным преимуществом методики; при этом указанная методика не обеспечивает непосредственный учет требований целочисленности исходных переменных, что несколько ограничивает область ее эффективного применения²;

– процедура построения целочисленной оптимизационной модели и ее реализации с использованием метода ветвей и границ² для определения оптимальных значений характеристик материала с учетом их дискретности, обусловленной ограниченным количеством образцов материала в составе выборки, на основе предварительно полученных расчетных значений характеристик.

Важно отметить, что вышеупомянутые инструментальные средства использовались в качестве базы для формирования отдельных элементов (этапов) предлагаемой методики для решения задачи обоснования характеристик конструктивного решения в области обеспечения энергетической эффективности объекта жилищного строительства. Подробное описание методики представлено в следующем разделе работы.

3 Results and Discussion

В рамках промежуточных этапов исследования была разработана методика обоснования характеристик конструктивного решения в области обеспечения энергетической эффективности

¹ Максимов Ю. Д.. Математика. Теория и практика по математической статистике. Конспект-справочник по теории вероятностей: учебное пособие; под ред. В.И. Антонова. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2009 — Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. 395 с.

² Акулич В.Л. Математическое моделирование в примерах и задачах: 3-е изд., стер. СПб. Изд-во «Лань», 2011. 352 с.



объекта жилищного строительства с использованием средств оптимизационного моделирования. Основными положениями разработанной методики явились следующие:

1. Объектом рассмотрения является конструктивное решение в области обеспечения энергетической эффективности объекта жилищного строительства, внутреннее пространство которого ограничено совокупностью многослойных (в общем случае) ограждающих конструкций – стен, перекрытий, окон и балконных дверей и др.

2. Рассматриваемое конструктивное решение предполагает использование определенного теплоизоляционного материала, изготовленного на основе минеральной (базальтовой) ваты, пенополистирола или экструдированного пенополистирола, в качестве дополнительного слоя в структуре каждой отдельной ограждающей конструкции в составе объекта жилищного строительства, относящейся к одной из следующих категорий: стены; покрытия и перекрытия над проездами; перекрытия чердачные над неотапливаемыми подпольями и подвалами.

3. Ограждающие конструкции в составе объекта жилищного строительства, по отношению к которым формируется конструктивное решение в области обеспечения энергетической эффективности, являются структурно однородными: потери теплоты, обусловленные линейными или точечными неоднородностями, пренебрежимо малы в сравнении с термическим сопротивлением конструкций.

4. Затраты на приобретение теплоизоляционного материала в расчете на единицу площади каждой отдельной ограждающей конструкции в составе объекта жилищного строительства (далее – удельная стоимость) определяются значениями отдельных технических характеристик материала; при этом соответствующая функциональная зависимость является линейной [6] и описывается выражением вида

$$C(\{x_j\}) = a_0 + \sum_{\substack{j=1 \\ \gamma_j=1}}^n a_{g=g_j} \cdot x_j, \quad (1)$$

где C – значение удельной стоимости теплоизоляционного материала, руб./м²;

n – количество технических характеристик, определяющих удельную стоимость теплоизоляционного материала, ед.;

a_0 – значение стоимостной константы, руб./м²;

a_g – коэффициент пропорциональности значения удельной стоимости материала значению отдельной технической характеристики утеплителя – параметр модели с индексом g ($g = 1, 2, \dots, G$), руб./м²·ЕИ;

G – общее количество параметров аналитической модели, определяющих взаимосвязь между значением удельной стоимости теплоизоляционного материала и значением его отдельной технической характеристики, ед.;

g_j – индекс параметра аналитической модели, соответствующий технической характеристике теплоизоляционного материала с индексом j ($j = 1, 2, \dots, n; \gamma_j = 1$);

γ_j – бинарный индикатор учета технической характеристики теплоизоляционного материала, определяемой индексом j ($j = 1, 2, \dots, n$), в составе аналитической модели зависимости; при $\gamma_j = 1$ характеристика входит в состав упомянутой модели, в противном случае $\gamma_j = 0$;

x_j – значение технической характеристики материала, определяемой индексом j ($j = 1, 2, \dots, n$), ЕИ;

ЕИ – вариативная единица измерения, определяемая физическим смыслом технической характеристики материала, описываемой индексом j ($j = 1, 2, \dots, n$).



Таблица 1. Характеристики, определяющие стоимость теплоизоляционного материала в расчете на единицу площади ограждающей конструкции
Table 1. Characteristics determining the cost of thermal insulation material per unit of the enclosing structure's area

№ п.п.	Наименование характеристики	Ед. изм.	Обозначение		Соответствие категории		Индекс параметра аналитической модели ⁽¹⁾
			исходное	универсальное	основн. хар-ки	дополн. хар-ки	
j	-	$EИ$	v_j^0	v_j	$j \in J^0$	$j \in \bar{J}$	g_j
1	Толщина	м	δ	x_1	+		-
2	Коэффициент теплопроводности	$\frac{Вт}{(м \cdot ^\circ C)}$	λ	x_2	+		-
3	Средняя плотность	кг/м ³	ρ	x_3		+	1
4	Водопоглощение по объему за 24 часа	%	μ	x_4		+	2
5	Группа горючести	-	φ	x_5		+	3
6	Изменение коэффициента теплопередачи ⁽²⁾	$\frac{Вт}{(м^2 \cdot ^\circ C)}$	ΔU	x_6	+		4

Примечание:

⁽¹⁾ индекс непосредственно связан со значением бинарного индикатора γ_j учета каждой отдельной характеристики в составе аналитической модели, указанной в п. 4 основных положений: при наличии индекса у отдельной технической характеристики $\gamma_j = 1$; в противном случае $\gamma_j = 0$;

⁽²⁾ техническая характеристика является производной от характеристик, определяемых пп. 1 и 2 таблицы, и вычисляется для каждой отдельной ограждающей конструкции по формуле

$$\Delta U = \frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_0 + \frac{\delta}{\lambda}},$$

где R_0 – исходное термическое сопротивление ограждающей конструкции (с отсутствующим слоем теплоизоляционного материала), м²·°C/Вт.

5. Затраты на монтаж теплоизоляционного материала в качестве дополнительного слоя для единицы площади каждой отдельной ограждающей конструкции не зависят от технических характеристик материала.

6. Параметры зависимости, описываемой выражением (1), – стоимостная константа a_0 и коэффициенты пропорциональности $\{a_j\}$ – определяются на основе технических характеристик допустимых к применению (по отношению к отдельной ограждающей конструкции) вариантов теплоизоляционного материала и потому в общем случае будут иметь уникальные значения для каждой отдельной ограждающей конструкции в составе объекта жилищного строительства.

7. Формирование аналитической модели зависимости, описываемой выражением (1), производится для каждой отдельной ограждающей конструкции в составе объекта жилищного строительства на основе группы допустимых к использованию образцов теплоизоляционного материала с известными значениями технических характеристик и стоимости в расчете на единицу площади ограждающей конструкции.

8. В качестве критерия для оценки адекватности аналитической модели зависимости, описываемой выражением (1), предлагается использовать скорректированный коэффициент детерминации [19].

9. Необходимо определить значения технических характеристик теплоизоляционного материала, используемого в качестве дополнительного слоя для каждой отдельной ограждающей конструкции в составе объекта жилищного строительства, на основе критериев минимизации срока окупаемости соответствующего конструктивного решения, а также минимизации суммарного (по ограждающим конструкциям) приведенного отклонения фактических значений

удельного (в расчете на единицу суммарной годовой экономии эксплуатационных затрат) изменения коэффициента теплопередачи от требуемых.

Структура разработанной методики, иллюстрируемая блок-схемой на рисунке 1, предполагает последовательное выполнение определенных этапов, подробное описание которых представлено ниже.

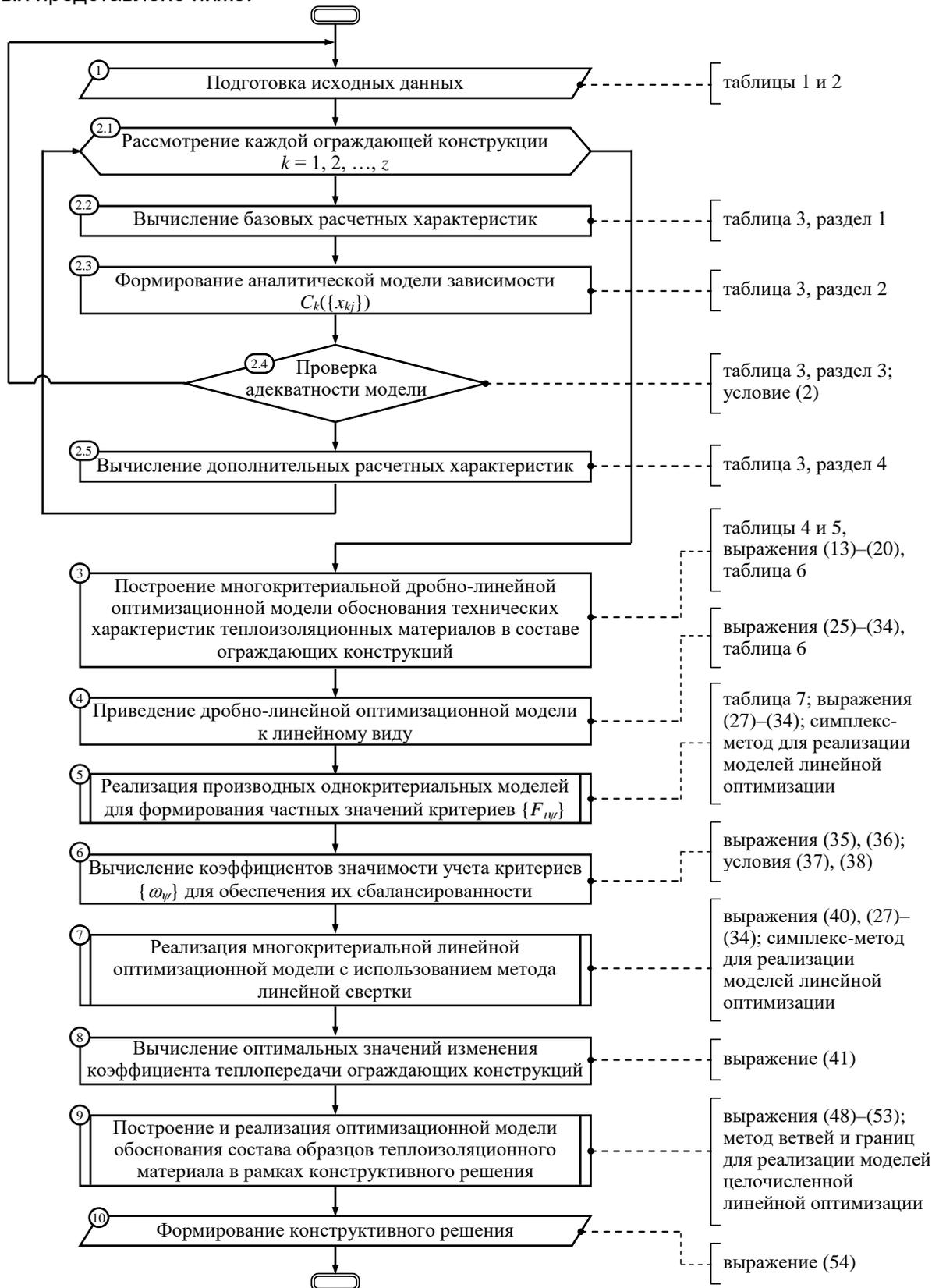


Рис. 1. Блок-схема разработанной методики
Fig. 1. Block scheme of the developed procedure



На первом этапе реализации методики осуществляется подготовка исходных данных для решения поставленной задачи. Более подробная информация приведена в таблице 2.

Таблица 2. Исходные данные для реализации методики
Table 2. Initial data for the implementation of the procedure

№ п.п.	Наименование элемента исходных данных	Ед. изм.	Обозначение / выражение
1	Параметры структуры исходных данных		
1.1	Количество образцов теплоизоляционного материала, которые могут быть использованы в рамках конструктивного решения	ед.	m
1.2	Общее количество технических характеристик теплоизоляционного материала	ед.	n
1.3	Количество технических характеристик теплоизоляционного материала, учитываемых в составе аналитической модели зависимости, определяемой выражением (1) ⁽¹⁾	ед.	G
1.4	Количество ограждающих конструкций в составе объекта жилищного строительства	ед.	z
1.5	Количество критериев нахождения оптимального решения	ед.	Ψ
2	Индексы и множества		
2.1	Индекс образца теплоизоляционного материала	-	$i = 1, 2, \dots, m$
2.2	Индекс технической характеристики теплоизоляционного материала	-	$j = 1, 2, \dots, n$
2.3	Индекс параметра аналитической модели зависимости, определяемой выражением (1)	-	$g = 0, 1, \dots, G$
2.4	Индекс ограждающей конструкции	-	$k = 1, 2, \dots, z$
2.5	Индекс критерия нахождения оптимального решения	-	$\psi = 1, 2, \dots, \Psi$
2.6	Множество индексов основных технических характеристик теплоизоляционного материала ⁽²⁾	-	J^0
2.7	Множество индексов дополнительных технических характеристик теплоизоляционного материала ⁽²⁾	-	\bar{J}
3	Общие исходные данные		
3.1	Коэффициент учета снижения теплотребления жилых зданий при наличии поквартирного учета тепловой энергии на отопление (СП 50.13330.2012 "Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция")	-	ξ
3.2	Коэффициент учета дополнительного теплотребления системы отопления (СП 50.13330.2012 "Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция")	-	β_h
3.3	Значение градусо-суток отопительного периода ⁽³⁾	$\frac{^{\circ}\text{C} \cdot \text{сут.}}{\text{ед.}}$	D_d
3.4	Удельная стоимость электроэнергии, расходуемой на отопление объекта жилищного строительства	$\frac{\text{руб.}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}$	c_e
3.5	Относительная уступка по минимальному значению суммарной годовой экономии эксплуатационных затрат	-	ζ
4	Исходные данные, формируемые для каждого отдельного образца теплоизоляционного материала с индексом i ($i = 1, 2, \dots, m$)		
4.1	Наименование образца материала	-	-
4.2	Значение стоимости материала в объеме, соответствующем единицы площади ограждающей конструкции (удельной стоимости)	$\frac{\text{руб.}}{\text{м}^2}$	c_i
5	Исходные данные, формируемые для каждой технической характеристики материала с индексом j ($j = 1, 2, \dots, n$)		
5.1	Наименование характеристики	-	-
5.2	Значение индикатора учета технической характеристики в составе аналитической модели зависимости, определяемой выражением (1) ⁽⁴⁾	-	γ_j
5.3	Значение индекса параметра аналитической модели зависимости, определяемой выражением (1)	-	g_j
6	Исходные данные, формируемые для каждого отдельного образца теплоизоляционного материала с индексом i ($i = 1, 2, \dots, m$) в части каждой отдельной исходной технической характеристики с индексом j ($j = 1, 2, \dots, n - 1$)		



№ п.п.	Наименование элемента исходных данных	Ед. изм.	Обозначение / выражение
6.1	Значение характеристики	<i>ЕИ</i> ⁽⁵⁾	x_{ij}
7	Исходные данные, формируемые для каждой отдельной ограждающей конструкции с индексом k ($k = 1, 2, \dots, z$)		
7.1	Наименование конструкции	-	-
7.2	Площадь фрагментов конструкции, по отношению к которым возможно использование теплоизоляционного материала в качестве дополнительного слоя	м ²	A_k
7.3	Затраты на монтаж теплоизоляционного материала в объеме, соответствующем единице площади конструкции	руб./м ²	$C_{\text{mt } k}$
7.4	Коэффициент учета отличий значений внутренней и наружной температуры у конструкции от принятых при расчете градусо-суток отопительного периода (СП 50.13330.2012 "Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция)	°С·сут./ед.	η_k
7.5	Исходное значение термического сопротивления конструкции ⁽⁶⁾	$\frac{\text{м}^2 \cdot \text{°С}}{\text{Вт}}$	R_{0k}
7.6	Требуемое значение термического сопротивления конструкции ⁽⁷⁾	$\frac{\text{м}^2 \cdot \text{°С}}{\text{Вт}}$	$R_{\text{req } k}$
7.7	Максимально допустимое относительное положительное (отрицательное) отклонение фактического значения удельного изменения коэффициента теплопередачи от требуемого значения	-	$\sigma_k^{+(-)\text{max}}$
7.8	Значение коэффициента значимости учета положительного (отрицательного) отклонения фактического значения удельного изменения коэффициента теплопередачи от требуемого значения ⁽⁸⁾	-	$p_k^{+(-)}$
7.9	Максимально допустимое относительное отклонение фактического значения удельного изменения коэффициента теплопередачи от оптимального значения	-	$\varepsilon_k^{\text{max}}$
8	Исходные данные, формируемые для каждого отдельного образца теплоизоляционного материала с индексом i ($i = 1, 2, \dots, m$) по отношению к каждой отдельной ограждающей конструкции с индексом k ($k = 1, 2, \dots, z$)		
8.1	Значение индикатора возможности применения образца материала в качестве дополнительного слоя в составе конструкции ⁽⁹⁾	-	γ_{ik}

Примечание:

- (1) взаимосвязь значения параметра со значением элемента исходных данных, указанного в п. 2.7, определяется выражением

$$S = |\bar{J}| + 1;$$

- (2) значения элементов исходных данных соответствуют условию:

$$|J^0| + |\bar{J}| = n;$$

- (3) значение элемента исходных данных рекомендуется определять по формуле из [22].

$$D_d = (t_{\text{int}} - t_{\text{ext}}) \cdot z_h,$$

где t_{int} , t_{ext} – расчетная температура соответственно внутреннего и наружного воздуха здания, °С [22];

z_h – продолжительность отопительного периода в пределах года, сут./ед. [22];

- (4) значение элемента исходных данных является бинарным ($\gamma_j \in \{0;1\}$) и формируется по принципу:

$\gamma_j = 1$ в случае, если характеристика с индексом j входит в состав аналитической модели зависимости; в противном случае $\gamma_j = 0$;

- (5) фрагмент *ЕИ* обозначает вариативную единицу измерения, определяемую физическим смыслом отдельной технической характеристики материала (см. столбец «Единица измерения» в таблице 1);



- (6) значение элемента исходных данных рекомендуется определять по формуле из [22]:

$$R_0 = \frac{1}{\alpha_{\text{int}}} + \sum_{s=1}^S \frac{\delta_s}{\lambda_s} + \frac{1}{\alpha_{\text{ext}}},$$

где R_0 – исходное термическое сопротивление конструкции, $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$;

α_{int} , α_{ext} – коэффициент теплоотдачи соответственно внутренней и наружной поверхности конструкции, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$;

S – количество слоев ограждающей конструкции, ед.;

δ_s , λ_s – соответственно толщина (м) и коэффициент теплопроводности ($\text{м} \cdot \text{°C}/\text{Вт}$) слоя с индексом S ($s = 1, 2, \dots, S$);

- (7) значение элемента исходных данных рекомендуется определять по формуле из [22]:

$$R_{\text{req}} = a \cdot D_d + b,$$

где R_{req} – требуемое значение термического сопротивления ограждающей конструкции, $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$;

a , b – поправочные коэффициенты масштаба ($\text{м}^2 \cdot \text{°C}/(\text{Вт} \cdot \text{°C} \cdot \text{сут})$) и смещения ($\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$) соответственно, значения которых определяются категорией ограждающей конструкции;

- (8) значения элементов исходных данных должны удовлетворять условию: $p_k^+, p_k^- \geq 0$, $k = 1, 2, \dots, z$;

- (9) значение элемента исходных данных является бинарным $\gamma_{ik} \in \{0, 1\}$ и формируется по следующему принципу; если образец i материала может быть применен в качестве дополнительного слоя в составе конструкции с индексом k , тогда $\gamma_{ik} = 1$; в противном случае $\gamma_{ik} = 0$.

В рамках следующего (второго) этапа методики производится последовательное рассмотрение (перебор) каждой из ограждающих конструкций с последующим формированием аналитической модели зависимости, определяемой выражением (1), (процедура выполняется с использованием метода наименьших квадратов, а также метода Крамера для решения соответствующих систем уравнений на основе соответствующей выборки образцов теплоизоляционного материала) и оценкой адекватности сформированных моделей на основе коэффициента детерминации. Описание расчетных характеристик, вычисляемых в рамках вышеописанного этапа, представлено в таблице 3. Аналитическая модель зависимости, определяемой выражением (1), признается адекватной в случае выполнения условия

$$\bar{R}_k^2 \geq 0,7, k = 1, 2, \dots, z. \quad (2)$$

В случае, если условие (2) не выполняется для отдельной ограждающей конструкции, производится корректировка соответствующих исходных данных в части состава образцов теплоизоляционного материала, допустимых к применению в составе конструкции.

Таблица 3. Расчетные характеристики, вычисляемые на этапе формирования аналитических моделей зависимости удельной стоимости теплоизоляционных материалов от их технических характеристик

Table 3. Estimated characteristics calculated at the stage of formation of analytical models for the dependence of the unit cost of heat-insulating materials on their technical characteristics

№ п.п.	Наименование расчетной характеристики	Ед. изм.	Выражение
1	Базовые расчетные характеристики, вычисляемые перед формированием аналитических моделей зависимости, определяемой выражением (1)		
1.1	Характеристики, вычисляемые для каждой отдельной ограждающей конструкции с индексом k ($k = 1, 2, \dots, z$)		
1.1.1	Множество индексов образцов теплоизоляционного материала, которые могут быть применены в качестве дополнительного слоя конструкции	-	$I_k = \{i \mid \gamma_{ik} = 1\}$
1.1.2	Количество образцов теплоизоляционного материала, которые могут быть применены в качестве дополнительного слоя конструкции	ед.	$m_k = I_k $

№ п.п.	Наименование расчетной характеристики	Ед. изм.	Выражение
1.1.3	Минимальное значение изменения коэф-та теплопередачи единицы площади конструкции при применении образца материала в качестве дополнительного слоя ⁽¹⁾	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}$	$\Delta U_k^{\min} = \min_{i \in I_k} \{ \Delta U_{ik} \}$
1.1.4	Максимальное значение изменения коэф-та теплопередачи единицы площади конструкции при применении образца материала в качестве дополнительного слоя ⁽¹⁾	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}$	$\Delta U_k^{\max} = \max_{i \in I_k} \{ \Delta U_{ik} \}$
1.2	Характеристики, вычисляемые для каждой отдельной ограждающей конструкции с индексом k ($k = 1, 2, \dots, z$) в части каждого допустимого к применению образца теплоизоляционного материала с индексом i ($i \in I_k$)		
1.2.1	Значение технической характеристики материала, определяемой индексом j ($j = 1, 2, \dots, n-1$)	$EИ$	$x_{kij} = x_{ij}$
1.2.2	Изменение коэффициента теплопередачи единицы площади конструкции при применении образца материала в качестве дополнительного слоя	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}$	$x_{kij=n} = \Delta U_{ik} = \frac{1}{R_{0k}} - \frac{1}{R_{0k} + \frac{\delta_i}{\lambda_i}} =$ $= \frac{\delta_i}{R_{0k} \cdot (R_{0k} \cdot \lambda_i + \delta_i)}$
2	Расчетные характеристики, вычисляемые при формировании аналитических моделей, определяемой выражением (1)		
2.1	Характеристики, вычисляемые для каждой отдельной ограждающей конструкции с индексом k ($k = 1, 2, \dots, z$)		
2.1.1	Значение элемента главной матрицы системы уравнений на пересечении строки с индексом l ($l = 0, 1, \dots, G$) и столбца с индексом d ($d = 0, 1, \dots, G$)	-	$A_{ld}^k = \begin{cases} m_k, & \text{если } l = 0, d = 0; \\ \sum_{i \in I_k} x_{kij=l}, & \text{если } l \geq 1, d = 0; \\ \sum_{i \in I_k} x_{kij=d}, & \text{если } l = 0, d \geq 1; \\ \sum_{i \in I_k} x_{kij=l} \cdot x_{kij=d}, & \text{в противном случае} \end{cases}$
2.1.2	Значение элемента частной матрицы системы уравнений, соответствующей параметру аналитической модели зависимости с индексом s ($s = 0, 1, \dots, G$), на пересечении строки с индексом l ($l = 0, 1, \dots, G$) и столбца с индексом d ($d = 0, 1, \dots, G$)	-	$A_{ld}^{kg} = \begin{cases} \sum_{i \in I_k} c_i, & \text{если } l = 0, d = g; \\ \sum_{i \in I_k} c_i \cdot x_{kij=l}, & \text{если } l \geq 1, d = g; \\ A_{ld}^k, & \text{в противном случае} \end{cases}$
2.1.3	Главная матрица системы уравнений	-	$A^k = \{ A_{ld}^k \}$
2.1.4	Частная матрица системы уравнений, соответствующая параметру аналитической модели зависимости с индексом g ($g = 0, 1, \dots, G$)	-	$A^{kg} = \{ A_{ld}^{kg} \}$
2.1.5	Значение параметра аналитической модели зависимости с индексом g ($g = 0, 1, \dots, G$)	$\frac{\text{руб.}}{\text{м}^2 \cdot (EИ)}$ ⁽²⁾	$a_{kg} = \frac{ A_{ld}^{kg} }{ A^k }$
3	Расчетные характеристики, вычисляемые при оценке адекватности сформированных аналитических моделей зависимости, определяемой выражением (1)		
3.1	Характеристики, вычисляемые для каждой отдельной ограждающей конструкции с индексом k ($k = 1, 2, \dots, z$) в части каждого допустимого к применению образца теплоизоляционного материала с индексом i ($i \in I_k$)		

№ п.п.	Наименование расчетной характеристики	Ед. изм.	Выражение
3.1.1	Прогнозное значение удельной стоимости для каждого образца теплоизоляционного материала с индексом i ($i \in I_k$), который может быть использован в составе конструкции	руб./м ²	$\hat{c}_{ik} = a_{kg=0} + \sum_{\substack{j=1 \\ \gamma_j=1}}^n a_{kg=g_j} \cdot x_{kij}$
3.2	Характеристики, вычисляемые для каждой отдельной ограждающей конструкции с индексом k ($k = 1, 2, \dots, z$)		
3.2.1	Коэффициент детерминации	-	$R_k^2 = 1 - \frac{\sum_{i \in I_k} (\hat{c}_{ik} - c_i)^2}{\sum_{i \in I_k} \left(c_i - \frac{\sum_{i \in I_k} c_i}{m_k} \right)^2}$
3.2.2	Скорректированный коэффициент детерминации	-	$\bar{R}_k^2 = 1 - (1 - R_k^2) \cdot \frac{m_k - 1}{m_k - (G + 1)}$
4	Дополнительные расчетные характеристики, вычисляемые после подтверждения адекватности сформированных аналитических моделей зависимости, определяемой выражением (1)		
4.1	Характеристики, вычисляемые для каждой отдельной ограждающей конструкции с индексом k ($k = 1, 2, \dots, z$) в части каждого допустимого к применению образца теплоизоляционного материала с индексом i ($i \in I_k$)		
4.1.1	Значение условно-постоянной компоненты удельной стоимости	руб./м ²	$\bar{c}_{ik} = a_{kg=0} + \sum_{\substack{j \in J \\ \gamma_j=1}} a_{kg=g_j} \cdot x_{kij}$
4.2	Характеристики, вычисляемые для каждой отдельной ограждающей конструкции с индексом k ($k = 1, 2, \dots, z$)		
4.2.1	Наиболее предпочтительное (минимальное) значение условно-постоянной компоненты удельной стоимости	руб./м ²	$\bar{C}_k = \min_{i \in I_k} \{ \bar{c}_{ik} \}$

Примечание:

- (1) расчет производится на основе результатов вычисления характеристики п. 1.2.1 таблицы;
- (2) параметру аналитической модели зависимости с индексом $g = 0$ (стоимостной константе) соответствует единица измерения руб./м², всем остальным параметрам с индексами $g > 0$ – единица измерения руб./(м²·ЕИ).

В рамках следующего (третьего) этапа методики производится формирование оптимизационной модели обоснования технических характеристик теплоизоляционных материалов в составе ограждающих конструкций в рамках объекта жилищного строительства. Описание соответствующих неизвестных переменных и расчетных характеристик приведено в таблицах 4 и 5 соответственно. Основными особенностями структуры вышеуказанной модели являются следующие:

- наличие двух целевых функций, соответствующих критериям нахождения оптимального решения: минимизации срока окупаемости рассматриваемого конструктивного решения; минимизации суммарного (по ограждающим конструкциям) приведенного отклонения фактических значений удельного (в расчете на единицу суммарной годовой экономии эксплуатационных затрат) изменения коэффициента теплопередачи конструкций от требуемых значений;

- не прямые ограничения модели учитывают предельно допустимые относительные отклонения фактических значений удельного изменения коэффициента теплопередачи ограждающих конструкций от требуемых значений;

- целесообразность рассмотрения в качестве неизвестных переменных только значений изменения коэффициентов теплопередачи ограждающих конструкций (основной технической характеристики теплоизоляционного материала) без учета дополнительных технических характеристик утеплителя, определяющих значение компонента – стоимости материалов – только одной из целевых функций – срока окупаемости – и не входящих в состав не прямых ограничений

Radaev A.E., Gamayunova O.S., Bardina G.A.

Optimization of energy efficiency design characteristics for construction projects;

2021; AlfaBuild; 20 Article No 2003. doi: 10.57728/ALF.20.3



модели; данная особенность определяет соответствие оптимальных значений дополнительных технических характеристик теплоизоляционного материала условию вида

$$\sum_{j \in \bar{J}} a_{kg=g_j} \cdot x_{kj}^{\text{opt}} = \min_{i \in I_k} \left\{ \sum_{j \in \bar{J}} a_{kg=g_j} \cdot x_{kij} \right\}, \quad k = 1, 2, \dots, z, \quad (3)$$

где x_{kj}^{opt} – оптимальное значение технической характеристики теплоизоляционного материала, определяемой индексом j ($j \in \bar{J}$), в составе ограждающей конструкции с индексом k ($k = 1, 2, \dots, z$), **ЕИ**;

в этой связи удельную стоимость теплоизоляционного материала, используемого в составе каждой отдельной ограждающей конструкции, целесообразно представить в виде

$$C_k = a_{kg=0} + \sum_{j \in \bar{J}} a_{kg=g_j} \cdot x_{kj} + a_{kg=G} \cdot x_{kj=n} = \bar{C}_k + a_{\Delta U k} \cdot \Delta U_k, \quad (4)$$

где \bar{C}_k – компонента удельной стоимости теплоизоляционного материала (руб./м²), используемого в составе ограждающей конструкции с индексом k ($k = 1, 2, \dots, z$), не зависящая от значений неизвестных переменных оптимизационной модели (далее – условно-постоянная компонента удельной стоимости), принимающая оптимальное значение, вычисляемое на основе выражения, указанного в п. 4.2.1 таблицы 3;

$a_{\Delta U k}$ – коэффициент пропорциональности значения удельной стоимости теплоизоляционного материала значению изменения коэффициента теплопередачи ограждающей конструкции с индексом k ($k = 1, 2, \dots, z$), руб.°С/Вт; в соответствии с информацией, представленной в таблице 1, $a_{\Delta U k} = a_{kg=G}$.

Таблица 4. Неизвестные переменные оптимизационной модели обоснования технических характеристик теплоизоляционных материалов в составе ограждающих конструкций
Table 4. Unknown variables of the optimization model for determination of the technical characteristics of heat-insulating materials within the enclosing structures

№ п.п.	Наименование неизвестной переменной ⁽¹⁾	Ед. изм.	Обозначение
1	Неизвестные переменные, рассматриваемые для каждой отдельной ограждающей конструкции с индексом k ($k = 1, 2, \dots, z$)		
1.1	Значение изменения коэффициента теплопередачи при использовании теплоизоляционного материала в составе конструкции	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°С}}$	ΔU_k
1.2	Отношение значения изменения коэф-та теплопередачи к значению суммарной (по ограждающим конструкциям) годовой экономии эксплуатационных затрат по результатам реализации конструктивного решения	$\frac{\text{Вт} \cdot \text{ед.}}{\text{м}^2 \cdot \text{°С} \cdot \text{руб.}}$	$\theta_k = \Delta U_k \cdot \theta_0$
1.3	Абсолютное положительное (отрицательное) отклонение фактического значения удельного (в расчете на единицу суммарной годовой экономии эксплуатационных затрат) изменения коэффициента теплопередачи конструкции (при использовании теплоизоляционного материала) от требуемого значения	$\frac{\text{Вт} \cdot \text{ед.}}{\text{м}^2 \cdot \text{°С} \cdot \text{руб.}}$	$\Delta_k^{+(-)}$
2	Агрегированные неизвестные переменные		
2.1	Обратное значение суммарной годовой экономии эксплуатационных затрат по результатам реализации конструктивного решения ⁽²⁾	(руб./ед.) ⁻¹	θ_0

Примечание:

- (1) неизвестные переменные, указанные в пп. 1.1 и 1.3 таблицы, учитываются в рамках исходной дробно-линейной оптимизационной модели, определяемой выражениями (13)–(20); неизвестные переменные, указанные в пп. 1.2, 1.3 и 2.1 таблицы, – в рамках модифицированной линейной оптимизационной модели, определяемой выражениями (25)–(34);
- (2) взаимосвязь значения переменной со значением расчетной характеристики, указанной в п. 2.3 таблицы 6, описывается выражением:

$$\theta_0 = \frac{1}{E^\Sigma}.$$

Таблица 5. Расчетные характеристики оптимизационной модели обоснования технических характеристик теплоизоляционных материалов в составе ограждающих конструкций
Table 5. Calculated characteristics of the optimization model for determination of the technical characteristics of heat-insulating materials within the enclosing structures

№ п.п.	Наименование расчетной характеристики	Ед. изм.	Выражение
1	Расчетные характеристики, не зависящие от неизвестных переменных		
1.1	Характеристики, вычисляемые для каждой отдельной ограждающей конструкции с индексом k ($k = 1, 2, \dots, z$)		
1.1.1	Требуемое значение изменения коэффициента теплопередачи конструкции (при использовании теплоизоляционного материала)	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$	$\Delta U_{\text{req}k} = \frac{1}{R_{0k}} - \frac{1}{R_{\text{req}k}}$
1.2	Агрегированные расчетные характеристики		
1.2.1	Удельная (отнесенная к единице величины изменения коэффициента теплопередачи для единицы площади конструкции) экономия эксплуатационных затрат на отопление объекта жилищного строительства	$\frac{\text{руб.} \cdot ^\circ\text{C}}{\text{ед.} \cdot \text{Вт}}$	$C_e = c_e \cdot D_d \cdot (1 - \xi) \cdot \beta_h$
2	Расчетные характеристики, зависящие от неизвестных переменных		
2.1	Характеристики, вычисляемые для каждой отдельной ограждающей конструкции с индексом k ($k = 1, 2, \dots, z$)		
2.1.1	Стоимость теплоизоляционного материала в объеме, соответствующем единице площади конструкции	$\frac{\text{руб.}}{\text{м}^2}$	$C_k = \bar{C}_k + a_{\Delta U k} \cdot \Delta U_k$
2.1.2	Стоимость теплоизоляционного материала и его монтажа для конструкции	руб.	$C_k^\Sigma = A_k \cdot (C_{\text{mnt}k} + C_k) =$ $= A_k \cdot (C_{\text{mnt}k} + \bar{C}_k + a_{\Delta U k} \cdot \Delta U_k)$
2.1.3	Уменьшение расхода тепловой энергии на отопление здания за отопительный период в течение года	кВт·ч/ед.	$\Delta Q_k = D_d \cdot (1 - \xi) \cdot \beta_h \cdot \eta_k \cdot A_k \cdot \Delta U_k$
2.1.4	Годовая экономия эксплуатационных затрат на отопление объекта жилищного строительства	руб./ед.	$E_k^\Sigma = c_e \cdot \Delta Q_k = C_e \cdot \eta_k \cdot A_k \cdot \Delta U_k$
2.1.5	Фактическое относительное положительное (отрицательное) отклонение фактического значения удельного (в расчете на единицу суммарной годовой экономии эксплуатационных затрат) изменения коэффициента теплопередачи от требуемого значения ⁽¹⁾	-	$\sigma_k^{+(-)} = \frac{\Delta_k^{+(-)}}{\frac{\Delta U_{\text{req}k}}{E^\Sigma}} =$ $= \frac{\Delta_k^{+(-)} \cdot C_e \cdot \sum_{k=1}^z \eta_k \cdot A_k \cdot \Delta U_k}{\Delta U_{\text{req}k}}$
2.1.6	Фактическое отклонение фактического значения удельного изменения коэффициента теплопередачи конструкции от требуемого значения ⁽¹⁾	$\frac{\text{Вт} \cdot \text{ед.}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{руб.}}$	$d_{\Delta U k} = \frac{\Delta U_k - \Delta U_{\text{req}k}}{E^\Sigma} =$ $= \frac{\Delta U_k - \Delta U_{\text{req}k}}{C_e \cdot \sum_{k=1}^z \eta_k \cdot A_k \cdot \Delta U_k}$
2.1.7	Расчетное отклонение фактического значения удельного изменения коэффициента теплопередачи конструкции от требуемого значения	$\frac{\text{Вт} \cdot \text{ед.}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{руб.}}$	$\bar{d}_{\Delta U k} = \Delta_k^+ - \Delta_k^-$
2.1.8	Фактическое значение термического сопротивления конструкции ⁽²⁾	$\frac{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}{\text{Вт}}$	$R_k = \frac{1}{\frac{1}{R_{0k}} - \Delta U_k} = \frac{R_{0k}}{1 - \Delta U_k \cdot R_{0k}}$



№ п.п.	Наименование расчетной характеристики	Ед. изм.	Выражение
2.2	Агрегированные расчетные характеристики		
2.2.1	Минимально допустимое обратное значение суммарной годовой экономии эксплуатационных затрат по результатам реализации конструктивного решения	(руб./ед.) ⁻¹	$\theta_0^{\min} = \frac{1}{C_e \cdot \sum_{k=1}^z \eta_k \cdot A_k \cdot \Delta U_k^{\max}}$
2.2.2	Максимально допустимое обратное значение суммарной годовой экономии эксплуатационных затрат по результатам реализации конструктивного решения	(руб./ед.) ⁻¹	$\theta_0^{\max} = \frac{1}{C_e \cdot \sum_{k=1}^z \eta_k \cdot A_k \cdot \Delta U_k^{\min}}$
2.2.3	Суммарная стоимость теплоизоляционных материалов и их монтажа для ограждающих конструкций в составе объекта жилищного строительства	руб.	$C^\Sigma = \sum_{k=1}^z C_k^\Sigma =$ $= \sum_{k=1}^z A_k \cdot (C_{\text{mnt}k} + \bar{C}_k + a_{\Delta U_k} \cdot \Delta U_k)$
2.2.4	Суммарная годовая экономия эксплуатационных затрат на отопление объекта жилищного строительства	руб./ед.	$E^\Sigma = \sum_{k=1}^z E_k^\Sigma = C_e \cdot \sum_{k=1}^z \eta_k \cdot A_k \cdot \Delta U_k$
2.2.5	Срок окупаемости рассматриваемого конструктивного решения	ед.	$T = \frac{C^\Sigma}{E^\Sigma} =$ $= \frac{\sum_{k=1}^z A_k \cdot (C_{\text{mnt}k} + \bar{C}_k + a_{\Delta U_k} \cdot \Delta U_k)}{C_e \cdot \sum_{k=1}^z \eta_k \cdot A_k \cdot \Delta U_k}$
2.2.6	Суммарное приведенное отклонение фактических значений удельного изменения коэффициента теплопередачи конструкций от требуемых	$\frac{\text{Вт} \cdot \text{ед.}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C} \cdot \text{руб.}}$	$\Delta^\Sigma = \sum_{k=1}^z (p_k^+ \cdot \Delta_k^+ + p_k^- \cdot \Delta_k^-)$

Примечание:

- (1) расчет характеристики производится на основе результатов вычислений элемента, указанного в п. 2.2.4 таблицы;
- (2) расчетная характеристика непосредственно не учитывается в составе оптимизационной модели и используется исключительно в рамках анализа результатов реализации модели.

Исходная оптимизационная модель обоснования технических характеристик теплоизоляционных материалов в составе ограждающих конструкций определяется следующими выражениями:



- в обобщенной форме записи:

$$F_1(\{\Delta U_k\}) = T(\{\Delta U_k\}) \rightarrow \min; \quad (5)$$

$$F_2(\{\Delta_k^+, \Delta_k^-\}) = \Delta^\Sigma(\{\Delta_k^+, \Delta_k^-\}) \rightarrow \min; \quad (6)$$

$$\Delta U_k^{\min} \leq \Delta U_k \leq \Delta U_k^{\max}, \quad k = 1, 2, \dots, z; \quad (7)$$

$$\Delta_k^+ \geq 0, \quad k = 1, 2, \dots, z; \quad (8)$$

$$\Delta_k^- \geq 0, \quad k = 1, 2, \dots, z; \quad (9)$$

$$d_{\Delta U_k}(\Delta U_k) = \bar{d}_{\Delta U_k}(\Delta_k^+, \Delta_k^-), \quad k = 1, 2, \dots, z; \quad (10)$$

$$\sigma_k^+(\{\Delta U_k\}, \Delta_k^+) \leq \sigma_k^{+\max}, \quad k = 1, 2, \dots, z; \quad (11)$$

$$\sigma_k^-(\{\Delta U_k\}, \Delta_k^-) \leq \sigma_k^{-\max}, \quad k = 1, 2, \dots, z; \quad (12)$$

- в развернутой форме записи:

$$F_1(\{\Delta U_k\}) = \frac{\sum_{k=1}^z A_k \cdot (C_{\text{mnt } k} + \bar{C}_k + a_{\Delta U_k} \cdot \Delta U_k)}{C_e \cdot \sum_{k=1}^z \eta_k \cdot A_k \cdot \Delta U_k} \rightarrow \min; \quad (13)$$

$$F_2(\{\Delta_k^+, \Delta_k^-\}) = \sum_{k=1}^z (p_k^+ \cdot \Delta_k^+ + p_k^- \cdot \Delta_k^-) \rightarrow \min; \quad (14)$$

$$\Delta U_k^{\min} \leq \Delta U_k \leq \Delta U_k^{\max}, \quad k = 1, 2, \dots, z; \quad (15)$$

$$\Delta_k^+ \geq 0, \quad k = 1, 2, \dots, z; \quad (16)$$

$$\Delta_k^- \geq 0, \quad k = 1, 2, \dots, z; \quad (17)$$

$$\frac{\Delta U_k - \Delta U_{\text{req } k}}{C_e \cdot \sum_{k=1}^z \eta_k \cdot A_k \cdot \Delta U_k} = \Delta_k^+ - \Delta_k^-, \quad k = 1, 2, \dots, z; \quad (18)$$

$$\frac{\Delta_k^+ \cdot C_e \cdot \sum_{k=1}^z \eta_k \cdot A_k \cdot \Delta U_k}{\Delta U_{\text{req } k}} \leq \sigma_k^{+\max}, \quad k = 1, 2, \dots, z; \quad (19)$$

$$\frac{\Delta_k^- \cdot C_e \cdot \sum_{k=1}^z \eta_k \cdot A_k \cdot \Delta U_k}{\Delta U_{\text{req } k}} \leq \sigma_k^{-\max}, \quad k = 1, 2, \dots, z; \quad (20)$$

где F_1 , F_2 – обозначение соответственно первого и второго критерия, используемого для нахождения оптимального решения.

Описание структурных элементов исходной оптимизационной модели обоснования технических характеристик теплоизоляционных материалов в составе ограждающих конструкций представлено в таблице 6.

Таблица 6. Описание структурных элементов оптимизационной модели обоснования технических характеристик теплоизоляционных материалов в составе ограждающих конструкций
Table 6. Description of the structural elements of the optimization model for determination of the technical characteristics of heat-insulating materials within the enclosing structures

Порядковый номер выражения оптимизационной модели			Описание
в дробно-линейном виде		в линейном виде	
обобщенная форма записи	развернутая форма записи		
5	13	25	Целевая функция, соответствующая первому критерию, – срок окупаемости рассматриваемого конструктивного решения – минимизируется
6	14	26	Целевая функция, соответствующая второму критерию, – суммарное приведенное отклонение фактических значений удельного (в расчете на единицу суммарной годовой экономии эксплуатационных затрат) изменения коэффициента теплопередачи ограждающих конструкций от требуемых значений – минимизируется
7	15	27	Прямые ограничения, определяющие соответствие значений неизвестных переменных – изменений коэффициентов теплопередачи ограждающих конструкций – диапазонам допустимых значений
8, 9	16, 17	28, 29	Прямые ограничения, определяющие неотрицательность значений неизвестных переменных – абсолютных положительного и отрицательного отклонений фактических значений удельного изменения коэффициента теплопередачи конструкций от требуемых значений
10	18	30	Непрямые ограничения, описывающие взаимосвязь между значениями неизвестных переменных – изменений коэффициентов теплопередачи ограждающих конструкций и абсолютными отклонениями фактических значений удельного изменения коэффициента теплопередачи конструкций от требуемых значений
11, 12	19, 20	31, 32	Непрямые ограничения, в соответствии с которыми фактические относительные положительное и отрицательное отклонения фактического значения удельного изменения коэффициента теплопередачи от требуемого значения не превышают соответствующие максимально допустимые значения для каждой отдельной ограждающей конструкции
-	-	33	Прямое ограничение, определяющее соответствие модифицированной неизвестной переменной – обратного значения суммарной годовой экономии эксплуатационных затрат на отопление объекта жилищного строительства – диапазону допустимых значений
-	-	34	Непрямое ограничение, определяющее целостность модифицированных неизвестных переменных, в соответствии с которым отношение фактического обратного значения суммарной годовой экономии эксплуатационных затрат на отопление объекта жилищного строительства к расчетному должно быть равно 1

Как видно из выражений (13)–(20), полученная оптимизационная модель является дробно-линейной и потому может быть приведена к линейному виду для последующей реализации симплекс-метода – универсального вычислительного алгоритма, обеспечивающего нахождение в общем случае единственного оптимального решения (при наличии области допустимых решений) в рамках линейных задач.

Выполнение вышеописанных процедур производится на следующем (четвертом) этапе методики. Приведение дробно-линейной модели, описываемой выражениями (13)–(20), к линейному виду осуществляется посредством последовательного выполнения следующих действий:



1. Замена исходных переменных $\{\Delta U_k\}$ в составе выражений (13), (18)–(20) на модифицированные переменные $\theta_0, \{\theta_k\}$ с учетом взаимосвязей, описываемых выражениями

$$\theta_0 = \frac{1}{E^\Sigma(\{\Delta U_k\})} = \frac{1}{C_e \cdot \sum_{k=1}^z \eta_k \cdot A_k \cdot \Delta U_k}; \quad (21)$$

$$\theta_k = \Delta U_k \cdot \theta_0 = \frac{\Delta U_k}{C_e \cdot \sum_{k=1}^z \eta_k \cdot A_k \cdot \Delta U_k}, \quad k = 1, 2, \dots, z; \quad (22)$$

2. Домножение левой и правой частей выражений (19), (20) на $\Delta U_{\text{req}k} \cdot \theta_0$.

3. Подстановка в выражение (15) дополнительной формулы для учета взаимосвязей переменных

$$\Delta U_k = \frac{\theta_k}{\theta_0}, \quad k = 1, 2, \dots, z \quad (23)$$

с последующим домножением левой и правой частей выражения на значение модифицированной переменной θ_0 .

4. Формирование дополнительного прямого ограничения для модифицированной переменной θ_0 на основе соответствующих минимально и максимально допустимых значений (таблица 5, пп. 2.2.1 и 2.2.2).

5. Формирование дополнительного непрямого ограничения, определяющего целостность переменных $\{\theta_{kj}\}$, на базе условия

$$E^\Sigma(\{x_{kj}\}) \cdot \theta_0 = 1. \quad (24)$$

Получаемая по результатам выполнения вышеописанных действий модифицированная оптимизационная модель имеет вид:

$$F_1(\theta_0, \{\theta_k\}) = \sum_{k=1}^z A_k \cdot ((C_{\text{mt}k} + \bar{C}_k) \cdot \theta_0 + a_{\Delta U_k} \cdot \theta_k) \rightarrow \min; \quad (25)$$

$$F_2(\{\Delta_k^+\}, \{\Delta_k^-\}) = \sum_{k=1}^z (p_k^+ \cdot \Delta_k^+ + p_k^- \cdot \Delta_k^-) \rightarrow \min; \quad (26)$$

$$\Delta U_k^{\min} \cdot \theta_0 \leq \theta_k \leq \Delta U_k^{\max} \cdot \theta_0, \quad k = 1, 2, \dots, z; \quad (27)$$

$$\Delta_k^+ \geq 0, \quad k = 1, 2, \dots, z; \quad (28)$$

$$\Delta_k^- \geq 0, \quad k = 1, 2, \dots, z; \quad (29)$$

$$\theta_k - \Delta U_{\text{req}k} \cdot \theta_0 = \Delta_k^+ - \Delta_k^-, \quad k = 1, 2, \dots, z; \quad (30)$$

$$\Delta_k^+ \leq \sigma_k^{\text{max}} \cdot \Delta U_{\text{req}k} \cdot \theta_0, \quad k = 1, 2, \dots, z; \quad (31)$$

$$\Delta_k^- \leq \sigma_k^{\text{max}} \cdot \Delta U_{\text{req}k} \cdot \theta_0, \quad k = 1, 2, \dots, z; \quad (32)$$

$$\theta_0^{\min} \leq \theta_0 \leq \theta_0^{\max}; \quad (33)$$

$$C_e \cdot \sum_{k=1}^z \eta_k \cdot A_k \cdot \theta_k = 1. \quad (34)$$

Описание структурных элементов модифицированной линейной модели обоснования технических характеристик теплоизоляционных материалов в составе ограждающих конструкций представлено в таблице 6.



Из выражений (25)–(34) видно, что модифицированная оптимизационная модель является линейной относительно неизвестных переменных $\theta_0, \{\theta_k\}$ и потому может быть эффективно реализована с использованием симплекс-метода, доступного в современных средах оптимизационного моделирования.

Тем не менее, многокритериальность (наличие двух целевых функций) модели не допускает непосредственной реализации модели и определяет целесообразность ее приведения к однокритериальному виду. В процессе исследования для выполнения соответствующей процедуры было предложено использовать метод линейной свертки критериев, в соответствии с которым в рамках следующего (пятого) этапа методики выполняется реализация производных (от структуры, определяемой выражениями (25)–(34)) однокритериальных моделей для вычисления частных значений критериев. Более подробная информация представлена в таблице 7.

Таблица 7. Принципы формирования частных значений критериев оптимизационной модели
Table 7. Principles of formation of particular values for the optimization model's criteria

Вариант однокритериальной модели	Целевая функция производной однокритериальной модели ⁽¹⁾	Частное значение в оптимальном решении для критерия с индексом (Ψ)	
		1	2
l	-	$F_{l\Psi=1}$	$F_{l\Psi=2}$
1	$F_1 \rightarrow \min$	$F_{11} = F_1^{\min}$	F_{12}
2	$F_2 \rightarrow \min$	F_{21}	$F_{22} = F_2^{\min}$
-	$F_1 \rightarrow \max$	F_1^{\max}	-
-	$F_2 \rightarrow \max$	-	F_2^{\max}

Примечание:

- ⁽¹⁾ при рассмотрении одного из двух критериев линейной модели, определяемых выражениями (25) и (26), в качестве целевой функции производной однокритериальной модели другой критерий игнорируется (не учитывается); ограничения каждой отдельной однокритериальной модели определяются выражениями (27)–(34)

На последующем (шестом) этапе методики производится расчет коэффициентов значимости учета критериев в соответствии с методом линейной свертки по формуле

$$\omega_{\Psi} = \frac{\Psi - \sum_{i=1}^{\Psi} F_{i\Psi}^N}{\Psi^2 - \sum_{i=1}^{\Psi} \sum_{\psi=1}^{\Psi} F_{i\psi}^N}, \quad \Psi = 1, 2, \dots, \Psi; \quad (35)$$

где $F_{i\Psi}^N$ – нормированное значение критерия с индексом Ψ ($\Psi = 1, 2, \dots, \Psi$), соответствующее варианту однокритериальной модели с индексом l ($l = 1, 2, \dots, \Psi$);

$$F_{i\Psi}^N = \frac{F_{i\Psi} - F_{\Psi}^{\max}}{F_{\Psi}^{\min} - F_{\Psi}^{\max}}, \quad \Psi = 1, 2, \dots, \Psi; \quad (36)$$

описание компонент формулы приведено в таблице 2 и таблице 7.

Важно отметить, что вычисленные в соответствии с формулой (35) значения коэффициентов значимости учета критериев будут удовлетворять условиям:

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_{\Psi} > 0, \quad \Psi = 1, 2, \dots, \Psi; \end{array} \right. \quad (37)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{\psi=1}^{\Psi} \omega_{\psi} = 1, \end{array} \right. \quad (38)$$

при этом каждое из вышеупомянутых значений будет прямопропорционально средней (по вариантам однокритериальной модели, представленным в таблице 7) разности экстремального и текущего нормированных частных значений критерия



$$\omega_{\psi} \sim 1 - \sum_{i=1}^{\Psi} F_{i\psi}^N, \psi = 1, 2, \dots, \Psi. \quad (39)$$

В рамках следующего (седьмого) этапа методики производится формирование однокритериальной линейной оптимизационной модели на основе многокритериальной линейной модели, полученной в рамках четвертого этапа методики (выражения (25)–(34)). В качестве целевой функции указанной однокритериальной модели рассматривается комплексный критерий Ω , определяемый выражением вида

$$\Omega(\theta_0, \{\theta_k\}, \{\Delta_k^+\}, \{\Delta_k^-\}) = \omega_1 \cdot \frac{F_1(\theta_0, \{\theta_k\}) - F_1^{\max}}{F_1^{\min} - F_1^{\max}} + \omega_2 \cdot \frac{F_2(\{\Delta_k^+\}, \{\Delta_k^-\}) - F_2^{\max}}{F_2^{\min} - F_2^{\max}} \rightarrow \max, \quad (40)$$

при этом ограничения модели полностью аналогичны тем, которые входят в состав многокритериальной линейной модели и описываются выражениями (28)–(35). Следует подчеркнуть, что структура комплексного критерия, определяемого выражением (40) вкпе со свойством коэффициентов значимости $\{\omega_{\psi}\}$, описываемым выражением (39), обеспечивает сбалансированную чувствительность комплексного критерия по отношению к значениям целевых функций, характеризуемых выражениями (25) и (26), и, как следствие, адекватность оценки альтернативных решений в процессе реализации модели.

Следующий (восьмой) этап методики предполагает вычисление оптимальных значений неизвестных переменных в соответствии с формулой

$$\Delta U_k^{\text{opt}} = \frac{\theta_k^{\text{opt}}}{\theta_0^{\text{opt}}}, k = 1, 2, \dots, z, \quad (41)$$

где $\theta_0^{\text{opt}}, \{\theta_k^{\text{opt}}\}$ – оптимальные значения модифицированных переменных, полученные в процессе реализации однокритериальной оптимизационной модели в рамках седьмого этапа методики.

В рамках предпоследнего (девятого) этапа методики производится формирование и реализация оптимизационной модели обоснования состава образцов теплоизоляционного материала в рамках рассматриваемого конструктивного решения по отношению к объекту жилищного строительства. Описание соответствующих неизвестных переменных и расчетных характеристик представлено в таблицах 8 и 9.

Таблица 8. Неизвестные переменные оптимизационной модели обоснования состава образцов теплоизоляционного материала в рамках рассматриваемого конструктивного решения
Table 8. Unknown variables of the optimization model for determination of the composition of heat-insulating material samples assumed within the considered design solution

№ п.п.	Наименование неизвестной переменной	Ед. изм.	Обозначение
1	Неизвестные переменные, рассматриваемые для каждой отдельной ограждающей конструкции с индексом k ($k = 1, 2, \dots, z$) в части каждого допустимого к применению образца теплоизоляционного материала с индексом i ($i \in I_k$)		
1.1	Значение индикатора целесообразности использования образца материала в качестве дополнительного слоя в составе конструкции ⁽¹⁾	-	y_{ik}

Примечание:

- ⁽¹⁾ значение переменной является бинарным ($y_{ik} \in \{0; 1\}$) и формируется в соответствии со следующим принципом: $y_{ik} = 1$ в случае, если образец материала с индексом i целесообразно использовать в качестве дополнительного слоя в составе конструкции с индексом k ; в противном случае $y_{ik} = 0$



Таблица 9. Расчетные характеристики оптимизационной модели обоснования состава образцов теплоизоляционного материала в рамках рассматриваемого конструктивного решения
Table 9. Calculated characteristics of the optimization model for determination of the composition of heat-insulating material samples assumed within the considered design solution

№ п.п.	Наименование расчетной характеристики	Ед. изм.	Выражение
1	Характеристики, вычисляемые для каждой отдельной ограждающей конструкции с индексом k ($k = 1, 2, \dots, z$)		
1.1	Суммарное количество используемых образцов теплоизоляционного материала в составе конструкции	ед.	$y_k^\Sigma = \sum_{i \in I_k} y_{ik}$
1.2	Фактическое значение удельной стоимости теплоизоляц. материала, используемого в составе конструкции	руб./м ²	$C'_k = \sum_{i \in I_k} c_i \cdot y_{ik}$
1.3	Фактическое значение стоимости теплоизоляционного материала и его монтажа для конструкции	руб.	$C_k'^{\Sigma} = A_k \cdot (C_{mntk} + C'_k) =$ $= A_k \cdot \left(C_{mntk} + \sum_{i \in I_k} c_i \cdot y_{ik} \right)$
1.4	Фактическое значение изменения коэффициента теплопередачи конструкции (при использовании теплоизоляционного материала)	Вт/м ² ·°С	$\Delta U'_k = \sum_{i \in I_k} \Delta U_{ik} \cdot y_{ik}$
1.5	Фактическое относительное отклонение фактического значения удельного (в расчете на единицу суммарной годовой экономии эксплуатационных затрат) изменения коэффициента теплопередачи конструкции от требуемого значения		$\sigma'_k = \frac{\frac{\Delta U'_k}{E_k'^{\Sigma}} - \frac{\Delta U_{reqk}}{E_k'^{\Sigma}}}{\frac{\Delta U_{reqk}}{E_k'^{\Sigma}}} = \frac{\sum_{i \in I_k} \Delta U_{ik} \cdot y_{ik} - \Delta U_{reqk}}{\Delta U_{reqk}}$
1.6	Фактическое относительное отклонение фактического значения изменения коэффициента теплопередачи конструкции от оптимального значения	=	$\varepsilon_k = \frac{\Delta U'_k - \Delta U_k^{opt}}{\Delta U_k^{opt}} = \frac{\sum_{i \in I_k} \Delta U_{ik} \cdot y_{ik} - \Delta U_k^{opt}}{\Delta U_k^{opt}}$
1.7	Фактическое значение годовой экономии эксплуатационных затрат на отопление объекта жилищного строительства	руб./ед.	$E_k'^{\Sigma} = C_e \cdot \eta_k \cdot A_k \cdot \Delta U'_k =$ $= C_e \cdot \eta_k \cdot A_k \cdot \sum_{i \in I_k} \Delta U_{ik} \cdot y_{ik}$
2	Агрегированные расчетные характеристики		
2.1	Фактическое значение суммарной стоимости теплоизоляционных материалов для ограждающих конструкций в составе объекта жилищного строительства	руб.	$C' = \sum_{k=1}^z C'_k = \sum_{k=1}^z \left(A_k \cdot \sum_{i \in I_k} c_i \cdot y_{ik} \right)$
2.2	Фактическое значение суммарной стоимости теплоизоляционных материалов и их монтажа для ограждающих конструкций в составе объекта жилищного строительства ⁽¹⁾	руб.	$C'^{\Sigma} = \sum_{k=1}^z C_k'^{\Sigma} = \sum_{k=1}^z A_k \cdot \left(C_{mntk} + \sum_{i \in I_k} c_i \cdot y_{ik} \right)$
2.3	Фактическое значение суммарной годовой экономии эксплуатационных затрат на отопление объекта жилищного строительства	руб./ед.	$E'^{\Sigma} = \sum_{k=1}^z E_k'^{\Sigma} = C_e \cdot \sum_{k=1}^z \left(\eta_k \cdot A_k \cdot \sum_{i \in I_k} \Delta U_{ik} \cdot y_{ik} \right)$
2.4	Минимально допустимое значение суммарной годовой экономии эксплуатационных затрат на отопление объекта жилищного строительства ⁽²⁾	руб./ед.	$E^{\Sigma min} = E^{\Sigma opt} \cdot (1 - \zeta)$



№ п.п.	Наименование расчетной характеристики	Ед. изм.	Выражение
2.5	Фактическое значение срока окупаемости рассматриваемого конструктивного решения ⁽¹⁾	ед.	$T' = \frac{C'^{\Sigma}}{E'^{\Sigma}} = \frac{\sum_{k=1}^z A_k \cdot \left(C_{mnt k} + \sum_{i \in I_k} c_i \cdot y_{ik} \right)}{C_e \cdot \sum_{k=1}^z \left(\eta_k \cdot A_k \cdot \sum_{i \in I_k} \Delta U_{ik} \cdot y_{ik} \right)}$

Примечание:

- (1) расчетная характеристика непосредственно не учитывается в составе оптимизационной модели и используется исключительно в рамках анализа результатов реализации модели;
- (2) компонента расчетного выражения $E^{\Sigma opt}$ означает оптимальное значение суммарной годовой экономии эксплуатационных затрат (руб./ед.), полученное по результатам реализации модифицированной линейной оптимизационной модели, определяемой выражениями (40), (28)–(35), в рамках седьмого этапа методики.

Оптимизационная модель обоснования состава образцов теплоизоляционного материала в рамках рассматриваемого конструктивного решения определяется следующими выражениями:

- в обобщенной форме записи:

$$C'(\{y_{ik}\}) \rightarrow \min; \quad (42)$$

$$y_{ik} \in \{0;1\}, k=1,2,\dots,z; i \in I_k; \quad (43)$$

$$y_k^{\Sigma}(\{y_{ki}\}) = 1, k=1,2,\dots,z; \quad (44)$$

$$-\sigma_k^{-\max} \leq \sigma'_k(\{y_{ik}\}) \leq \sigma_k^{+\max}, k=1,2,\dots,z; \quad (45)$$

$$-\varepsilon_k^{\max} \leq \varepsilon_k(\{y_{ik}\}) \leq \varepsilon_k^{\max}, k=1,2,\dots,z; \quad (46)$$

$$E'^{\Sigma}(\{y_{ik}\}) \geq E^{\Sigma \min}; \quad (47)$$

- в развернутой форме записи

$$\sum_{k=1}^z \left(A_k \cdot \sum_{i \in I_k} c_i \cdot y_{ik} \right) \rightarrow \min; \quad (48)$$

$$y_{ik} \in \{0;1\}, k=1,2,\dots,z; i \in I_k; \quad (49)$$

$$\sum_{i \in I_k} y_{ik} = 1, k=1,2,\dots,z; \quad (50)$$

$$-\sigma_k^{-\max} \leq \frac{\sum_{i \in I_k} \Delta U_{ik} \cdot y_{ik} - \Delta U_{req k}}{\Delta U_{req k}} \leq \sigma_k^{+\max}, k=1,2,\dots,z; \quad (51)$$

$$-\varepsilon_k^{\max} \leq \frac{\sum_{i \in I_k} \Delta U_{ik} \cdot y_{ik} - \Delta U_k^{opt}}{\Delta U_k^{opt}} \leq \varepsilon_k^{\max}, k=1,2,\dots,z; \quad (52)$$

$$C_e \cdot \sum_{k=1}^z \left(\eta_k \cdot A_k \cdot \sum_{i \in I_k} \Delta U_{ik} \cdot y_{ik} \right) \geq E^{\Sigma opt} \cdot (1 - \zeta). \quad (53)$$

Описание структурных элементов оптимизационной модели обоснования состава образцов теплоизоляционного материала в рамках рассматриваемого конструктивного решения представлено в таблице 10.



Таблица 10. Описание структурных элементов оптимизационной модели обоснования состава образцов теплоизоляционного материала в рамках рассматриваемого конструктивного решения

Table 10. Description of the structural elements of the optimization model for the determination of the composition of the samples of heat-insulating material assumed within the considered design solution

Порядковый номер выражения оптимизационной модели		Описание
обобщенная форма записи	развернутая форма записи	
42	48	Целевая функция – фактическое значение суммарной стоимости теплоизоляционных материалов для ограждающих конструкций в составе объекта жилищного строительства – минимизируется
43	49	Прямые ограничения, определяющие бинарность значений неизвестных переменных – индикаторов целесообразности использования образцов материала в качестве дополнительных слоев в составе ограждающих конструкций
44	50	Непрямые ограничения, определяющие необходимость использования единственного образца теплоизоляционного материала в качестве дополнительного слоя в составе каждой отдельной ограждающей конструкции
45	51	Непрямые ограничения, определяющие соответствие фактического относительного отклонения фактического значения удельного (в расчете на единицу суммарной годовой экономии эксплуатационных затрат) изменения коэффициента теплопередачи конструкции от требуемого значения диапазону допустимых значений для каждой отдельной ограждающей конструкции
46	52	Непрямые ограничения, определяющие соответствие фактического относительного отклонения фактического значения изменения коэффициента теплопередачи конструкции от оптимального значения диапазону допустимых значений для каждой отдельной ограждающей конструкции
47	53	Непрямое ограничение, в соответствии с которым фактическое значение суммарной годовой экономии эксплуатационных затрат на отопление объекта жилищного строительства не должно быть меньше соответствующего минимально допустимого значения

Как видно из выражений (48)–(53), оптимизационная модель соответствует процедуре целочисленной линейной оптимизации и потому может быть эффективно реализована с использованием метода ветвей и границ, доступного в современных средах оптимизационного моделирования.

На последнем (десятом) этапе методики осуществляется формирование соответствующего конструктивного решения в части отобранных для ограждающих конструкций образцов теплоизоляционного материала, индексы которых удовлетворяют условиям:

$$i_k^* : y_{i=i_k^*,k}^{\text{opt}} = \max_i \{y_{ik}^{\text{opt}}\} = 1, k = 1, 2, \dots, z, \quad (54)$$

где i_k^* – индекс наиболее предпочтительного образца материала с индексом k ($k = 1, 2, \dots, z$);

y_{ik}^{opt} – значение индикатора целесообразности использования образца материала с индексом i ($i \in I_k$) в качестве дополнительного слоя в составе конструкции с индексом k ($k = 1, 2, \dots, z$), полученное по результатам реализации оптимизационной модели, определяемой выражениями (48)–(53).

Таким образом, разработанная методика обеспечивает подбор конкретных образцов теплоизоляционного материала, используемых в составе ограждающих конструкций, в рамках конструктивного решения в области повышения энергетической эффективности объекта жилищного строительства.

Важно отметить, что предлагаемая методика, в отличие от разработок, представленных в диссертации [21], обладает следующими преимуществами:



- возможность обоснования технических характеристик теплоизоляционных материалов одновременно для всех ограждающих конструкций, проверяемых по условию обеспечения тепловой защиты [22], в составе отдельного объекта жилищного строительства; адекватный учет влияния характеристик теплоизоляционного материала в составе каждой отдельной ограждающей конструкции на показатели энергетической эффективности и экономической целесообразности конструктивного решения в целом;

- минимальное количество процедур аппроксимации – формирования аналитических моделей зависимостей между стоимостными и техническими характеристиками теплоизоляционных материалов – в структуре процесса реализации методики, неминуемо снижающих адекватность получаемых результатов; отсутствие необходимости обеспечения соответствия адекватности аналитических моделей друг другу как обязательного условия для получения конечных результатов.

Тем не менее, следует обратить внимание и на некоторые особенности разработанной методики, существенно ограничивающие область эффективного применения разработанного инструментального средства. К указанным особенностям относятся следующие:

- обоснование характеристик теплоизоляционных материалов в составе ограждающих конструкций только на основе условия обеспечения тепловой защиты объекта жилищного строительства без учета остальных условий (воздухопроницаемости, теплоустойчивости и т.д.), представленных в нормативной документации [22];

- невозможность одновременного обоснования характеристик для нескольких слоев теплоизоляционного материала, имеющих в общем случае различное функциональное назначение, в составе каждой отдельной ограждающей конструкции;

- зависимость конечных результатов, в том числе в части показателей экономической целесообразности конструктивного решения, от состава учитываемых образцов теплоизоляционного материала; как следствие, необходимость подготовки большого объема статистических данных о доступных на момент решения задачи образцах теплоизоляционного материала.

Таким образом, в рамках выполнения основных этапов исследования были получены следующие результаты:

1. Выполнен обзор и сравнительный анализ научных работ в области обоснования характеристик теплоизоляционных материалов в составе ограждающих конструкций объектов жилищного строительства; по результатам выполнения вышеупомянутых процедур сделан вывод об ограниченности существующих инструментальных средств, не обеспечивающих учет технических характеристик теплоизоляционных материалов в составе всех ограждающих конструкций в рамках объекта жилищного строительства (в общем случае соответствующих различным категориям и имеющих различные площади утепления) при анализе энергетической эффективности и экономической целесообразности конструктивного решения.

2. Разработана методика обоснования характеристик конструктивного решения в области обеспечения энергетической эффективности объекта жилищного строительства, предполагающая последовательную реализацию моделей дробно-линейной и целочисленной линейной оптимизации для обоснования состава образцов теплоизоляционного материала в составе ограждающих конструкций.

4 Conclusions

По результатам исследования были сделаны следующие выводы:

- отдельные категории задач обоснования характеристик конструктивных решений в области обеспечения энергетической эффективности в составе объектов жилищного строительства могут быть эффективно решены посредством построения и реализации моделей дробно-линейной и целочисленной линейной оптимизации;

- состав учитываемых образцов теплоизоляционного материала является определяющим не только для обеспечения адекватности формируемых аналитических моделей зависимости стоимостных характеристик теплоизоляционных материалов в составе ограждающих конструкций от технических характеристик, но также и для обеспечения адекватности результатов реализации оптимизационных моделей обоснования технических характеристик теплоизоляционных материалов.

На дальнейших этапах исследования предполагается укрупнение состава учитываемых образцов теплоизоляционного материала для реализации методики на практическом примере с Radaev A.E., Gamayunova O.S., Bardina G.A.



учетом большей вариативности значений градусо-суток отопительного периода с целью получения универсальных зависимостей между исходными данными и показателями энергетической эффективности и экономической целесообразности конструктивного решения.

References

1. Vatin, N.I., Nemova, D.V., Rymkevich, P.P., Gorshkov, A.S. Assessment of projected payback period of works on warming of facades during capital repairs of residential buildings of the first mass series. *Roofing and insulation materials*. 2015. 6. Pp. 33–39.
2. Vilinskaya, A.O., Nemova, D.V., Davydova, E.I., Gnam, P.A. Rising the energy efficiency class of public building. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2015. 9(36). Pp. 7–17.
3. Popova, E.M., Ptukhina, I.S., Radaev, A.E. Method of substantiation of organizational and processing characteristics of the complex of construction sites based on linear fractional programming. *Vestnik MGSU*. 2020. (6). Pp. 907–938. DOI:10.22227/1997-0935.2020.6.907-938.
4. Mussorina, T., Bagautdinov, R., Rakova, X. Energy-efficiency of industrial area as a part of renovation project. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2016. 12(51). Pp. 61–72. DOI:10.18720/CUBS.51.5.
5. Gorshkov, A.S., Vatin, N.I., Rymkevich, P.P., Kydrevich, O.O. Payback period of investments in energy saving. *Magazine of Civil Engineering*. 2018. 2(78). Pp. 65–75. DOI:10.18720/MCE.78.5.
6. Gorshkov, A.S., Korniyenko, S.V. The technical and economic basis of facade systems. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2019. 1(76). Pp. 30–40. DOI:10.18720/CUBS.76.3.
7. Gorshkov, A.S., Rymkevich, P.P. Methodology and sample calculation of ROI when implementing energy saving measures in building. *Building materials, equipment, technologies of the XXI century*. 2014. 9(188). Pp. 40–45.
8. Gorshkov, A.S., Rymkevich, P.P., Nemova, D.V., Vatin, N.I. Method of calculating the payback period of investment for renovation of building facades. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2014. 2(17). Pp. 82–106.
9. Nemova, D.V., Vatin, N.I., Gorshkov, A.S., Kashabin, A.V., Rymkevich, P.P., Tseitin, D.N. Technical and economic assessment on actions for heat insulation of external envelopes of an individual house. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2014. 8(23). Pp. 93–115.
10. Romanova, A.A., Rymkevich, P.P., Gorshkov, A.S. Calculating methods for the projected payback of energy-saving measures for buildings insulation. *Technical and technological problems of service*. 2014. 4(30). Pp. 68–74.
11. Tseytin, D.N., Vatin, N.I., Nemova, D.V., Rymkevich, P.P., Gorshkov, A.S. Feasibility study for renovation of facades heat insulation of residential buildings of the first mass series. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2016. 1(40). Pp. 20–31.
12. Yartsev, V.P., Strulev, S.A., Mamontov, A.A., Struleva, I.A., Zherebtsov, A.V., Popinako, E.O. Analysis of economic feasibility of the various enclosing structures of buildings. *Roofing and insulation materials*. 2018. 4. Pp. 29–32.
13. Ivanova, I.B., Romanov, M.A. Selection of the design solution based on the system of indicators using the method of pair comparisons. *Socio-economic management: theory and practice*. 2019. 1(36). Pp. 80–82.
14. Petrov, P.V., Rezanov, E.M., Vedruchenko, V.R., Starikov, A.P. Determination of optimum thickness of thermal isolation of the protecting designs of buildings at capital repairs. *Omsk Scientific Bulletin*. 2015. 3(143). Pp. 254–258.
15. Stakhov, A.E., Andrenko, A.A. Economic assessment of structural solutions for thermal protection of buildings. *AVOK: Ventilation, heating, air conditioning, heat supply and building thermal physics*. 2018. 4. Pp. 42–47.
16. Karmellos, M., Kiprakis, A., Mavrotas, G. A multi-objective approach for optimal prioritization of energy efficiency measures in buildings: Model, software and case studies. *Applied Energy*. 2015. 139. Pp. 131–150.
17. Alekseytsev, A.V. Search for rational parameters of building structures based on multi-criteria evolutionary optimization. *Industrial and civil construction*. 2019. 7. Pp. 18–22.
18. Wei, Y., Baizhan, L., Hongyuan, J., Ming, Z., Di, W. Application of multi-objective genetic algorithm to optimize energy efficiency and thermal comfort in building design. *Energy and Buildings*. 2015. 88. Pp. 135–143.

Radaev A.E., Gamayunova O.S., Bardina G.A.

Optimization of energy efficiency design characteristics for construction projects; 2021; *AlfaBuild*; 20 Article No 2003. doi: 10.57728/ALF.20.3



19. Gamayunova, O.S., Radaev, A.E., Petrichenko, M.R. The procedure for determination of the dependence of the cost of insulation materials on their thermophysical characteristics. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. 660. Pp. 012018. DOI:10.1088/1757-899X/660/1/012018.
20. Gamayunova, O.S. Determination of the cost of insulation on their thermophysical characteristics. Construction of Unique Buildings and Structures. 2019. 1(76). Pp. 19–29. DOI:10.18720/CUBS.76.2.
21. Gamayunova, O.S. Procedure for the determination of thermotechnical characteristics for the wall structures of residential buildings.. 2020URL: <https://www.spbstu.ru/dsb/07ce-thesis.pdf>.
22. Gamayunova, O.S. Choice of the optimal option of warming of residential houses in various climate zones. Construction and industrial safety. 2019. 16(68). Pp. 89–97.