

Раздел 3. Инженерное обеспечение

УДК 692.23

МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО МАТЕРИАЛА В СОСТАВЕ ОГРАЖДАЮЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СРЕДСТВ КВАДРАТИЧНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Олехнович¹ Я. А., Радаев² А. Е.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
E-mail: ¹oyanis@list.ru; ²radaev_ae@spbstu.ru

Аннотация: Актуальность исследования определяется важностью проблем обоснования характеристик конструктивных решений, применяемых при возведении или реконструкции зданий и сооружений (с учетом показателей энергетической и экономической эффективности), а также относительно невысокой практической значимостью соответствующих научных разработок.

Постановка задачи. Необходимо определить наиболее предпочтительный вариант (модель) теплоизоляционного материала, используемого в качестве дополнительного слоя в составе стенового ограждения, на основе критериев обеспечиваемого сопротивления теплопередаче и срока окупаемости соответствующего конструктивного решения.

Цель работы. Разработка инструментальных средств обоснования характеристик теплоизоляционного материала в составе стенового ограждения в рамках жилого здания.

Задачами исследования являются: 1. Обзор и сравнительный анализ научных разработок в области исследования. 2. Разработка методики обоснования характеристик теплоизоляционного материала в составе стенового ограждения с использованием средств квадратичной оптимизации. 3. Реализация разработанной методики на практическом примере.

Результаты. Разработана методика обоснования характеристик теплоизоляционного материала в составе стенового ограждения с использованием средств квадратичной оптимизации. Осуществлена реализация методики на практическом примере, выполнен анализ полученных результатов.

Выводы. Результаты реализации методики на практическом примере подтверждают высокую практическую значимость разработанного инструментального средства. Таким образом, средства квадратичной оптимизации могут быть эффективно использованы для решения задачи обоснования характеристик теплоизоляционного материала в составе стенового ограждения.

Ключевые слова: стеновое ограждение, оптимизационная модель, энергоэффективность, теплоизоляционный материал, сопротивление теплопередаче, характеристики материала.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из ключевых задач, решаемых при проектировании новых и реновации существующих объектов строительства, является обеспечение показателей энергетической эффективности, способствующих сокращению затрат на отопление зданий и сооружений. Важность решения упомянутой задачи также подтверждается наличием требований к теплотехническим показателям стеновых ограждений в составе здания, приведенных в отечественной нормативной документации.

Решение задачи обеспечения показателей энергетической эффективности здания, способствующих сокращению затрат на отопление, в общем случае производится посредством формирования конструктивных решений по отношению к соответствующим стеновым ограждениям, предполагающих использование различных теплоизоляционных материалов, с использованием различных критериев предпочтительности вариантов решений. Трудность решения указанной задачи обусловлена широким разнообразием производителей и моделей теплоизоляционных материалов, а также сложным

характером взаимосвязей между техническими характеристиками материала, используемого в составе стенового ограждения, и показателями, описывающими энергетическую эффективность и экономическую целесообразность соответствующего конструктивного решения. Также важно отметить, что результаты предварительного обзора работ зарубежных и отечественных авторов в области обоснования характеристик теплоизоляционного материала (далее – утеплителя) в составе ограждающих конструкций засвидетельствовали относительно невысокую практическую значимость соответствующих научных разработок. Вышеуказанные обстоятельства определили целесообразность проведения исследования, целью которого является разработка инструментальных средств обоснования характеристик утеплителя в составе стенового ограждения в рамках жилого здания.

Объектом исследования является конструктивное решение, формируемое по отношению к стеновому ограждению в составе жилого здания, предполагающее использование утеплителя в качестве отдельного слоя..

Предметом исследования являются характеристики вышеупомянутого конструктивного решения в части применяемого утеплителя, а также соответствующие показатели энергетической эффективности.

На начальных этапах исследования выполнен обзор и сравнительный анализ научных разработок в области обоснования характеристик утеплителей в составе ограждающих конструкций в рамках жилых зданий. На основе результатов выполнения указанной процедуры были сделаны следующие выводы:

1. Научные разработки, относящиеся к рассматриваемой предметной области, классифицируются по следующим основным признакам:

– *разновидность научных результатов, относящихся к разработкам методического характера*: рекомендации по доработке и актуализации нормативно-технической документации РФ, основанные на анализе действующих нормативных требований в области тепловой защиты зданий и сооружений [1-4]; экономический анализ показателей различных конструктивных решений в области тепловой защиты зданий, позволяющий делать выводы о полезности (общей и предельной) применения тех или иных конструктивных решений [5]; выявление факторов, определяющих допустимую степень оптимизации (уменьшения) затрат, связанных с повышением тепловой защиты зданий [6-8]; практические рекомендации в части теплоизолирующих материалов для различных вариантов стеновых ограждений [9]

– *математическое описание теплотехнических свойств и характеристик различных категорий ограждающих конструкций, определяемых в том числе условиями эксплуатации*: экспериментальное обоснование теплотехнических характеристик (в частности, приведенного сопротивления теплопередаче) светопрозрачных конструкций [10-12]; анализ теплотерь ограждающих конструкций при их контакте с грунтовыми массивами [13,14]; исследования теплотехнических свойств конструкций, выполненных из материалов – отходов теплоэнергетики [15], численное моделирование поведения вентилируемых фасадов в экстремальных климатических условиях [16];

– *категория инструментальных средств математического моделирования для определения оптимального конструктивного решения в области тепловой защиты здания*: квадратичное программирование [17], линейная многофакторная оптимизация [18,19].

2. Подавляющее большинство разработок обладают относительно невысокой практической значимостью ввиду следующих особенностей:

– отсутствие математического описания взаимосвязей между характеристиками конструктивных решений и показателями энергетической эффективности зданий;

– отсутствие учета взаимосвязи между характеристиками конструктивного решения в части используемых строительных материалов и сроком окупаемости упомянутого решения;

– существенная степень зависимости получаемых результатов от объема и качества исходных статистических данных.

Для достижения указанной цели исследования в процессе исследования были сформулированы следующие задачи:

1. Разработка методики обоснования характеристик теплоизоляционного материала в составе ограждающей конструкции с использованием средств квадратичной оптимизации.

2. Реализация разработанной методики на практическом примере.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В рамках промежуточных этапов исследования была разработана методика обоснования характеристик утеплителя в составе стенового ограждения с использованием средств квадратичной оптимизации.

Разработанная методика базируется на следующих основных положениях:

1. Объектом моделирования является внешнее стеновое ограждение, по отношению к которому реализуется проектное решение в области обеспечения требуемого значения сопротивления теплопередаче в рамках реализации мероприятий по повышению энергетической эффективности соответствующего жилого здания на этапе реновации.

2. Реализуемое проектное решение предполагает применение утеплителя в качестве дополнительного слоя в составе рассматриваемого стенового ограждения и подразумевает наличие капитальных затрат, связанных с приобретением материала и его монтажом.

3. Результатом реализации проектного решения является сопротивление теплопередаче рассматриваемого стенового ограждения, обуславливающее уменьшение периодических затрат на отопление объекта строительства за счет уменьшения коэффициента теплопередачи стенового ограждения при увеличении его сопротивления теплопередаче до требуемого значения.

4. Существует функциональная взаимосвязь между удельными – относящимися к единице площади поверхности стенового ограждения – затратами на приобретение утеплителя и его отдельными техническими характеристиками, в состав которых обязательно входят коэффициент теплопроводности и толщина материала. Коэффициент теплопроводности является основной технической характеристикой, все остальные характеристики являются дополнительными. При этом аналогичная взаимосвязь между затратами на

монтаж утеплителя и его техническими характеристиками отсутствует.

5. Удельные затраты на приобретение утеплителя линейно зависят от следующих категорий: обратное значение основной технической характеристики материала; отношение значения каждой отдельной дополнительной технической характеристики к значению основной технической характеристики.

6. Аналитическая модель взаимосвязи между удельными затратами на приобретение утеплителя и его техническими характеристиками определяется выражением вида

$$\tilde{y} = \beta_0 + \sum_{j=1}^n \beta_j \cdot \theta_j$$

где \tilde{y} – прогнозируемое значение удельных затрат на приобретение утеплителя, руб./м²;

j – индекс независимой категории, учитываемой в составе аналитической модели (технической характеристики утеплителя); $j = 1, 2, \dots, n$;

j_λ – значение индекса независимой категории, соответствующей основной технической характеристике утеплителя, в составе аналитической модели; $j_\lambda \in \{1; 2; \dots; n\}$;

n – количество независимых категорий, учитываемых в составе аналитической модели, ед.;

θ_j – значение независимой категории (учитываемой в составе аналитической модели) с индексом j ($j = 1, 2, \dots, n$), ЕИ_{θj};

$$\theta_j = \begin{cases} \frac{1}{\chi_j}, & j = j_\lambda; \\ \frac{\chi_j}{\chi_{j'=j_\lambda}}, & j \neq j_\lambda; \end{cases} \quad 2$$

χ_j – значение технической характеристики, соответствующей независимой категории (учитываемой в составе аналитической модели) с индексом j ($j = 1, 2, \dots, n$), ЕИ_{χj};

ЕИ_{θj}, ЕИ_{χj} – единица измерения соответственно независимой категории аналитической модели и технической характеристики теплоизоляционного материала с индексом j ($j = 1, 2, \dots, n$);

β_j – параметр аналитической модели – коэффициент пропорциональности прогнозного

значения удельных затрат на приобретение утеплителя от значения независимой категории с индексом j ($j = 1, 2, \dots, n$), (руб./м² · ЕИ_{θj});

β_0 – дополнительный параметр аналитической модели – условно-независимые (от значений технических характеристик материала) удельные затраты на приобретение утеплителя, руб./м².

7. Формирование аналитической модели,

о
п
р
е
е
д
е
л
я

8. Для оценки статистической значимости сформированной аналитической модели взаимосвязи между удельными затратами на приобретение утеплителя и его техническими характеристиками целесообразно использовать следующие расчетные характеристики: расчетное значение критерия Фишера; расчетная вероятность ошибочного признания статистической значимости сформированной модели.

9. Для оценки степени адекватности аналитической модели взаимосвязи между удельными затратами на приобретение утеплителя и его техническими характеристиками целесообразно использовать коэффициент детерминации.

10. Требуется определить наиболее предпочтительный вариант утеплителя, при котором обеспечивается минимальное значение срока окупаемости (отношения удельных затрат на приобретение и монтаж утеплителя к соответствующей экономии периодических затрат на отопление здания) рассматриваемого проектного решения при условии, что фактическое отклонение расчетного значения сопротивления теплопередаче (вычисленного для стенового ограждения) от нормативного значения не превысит максимально допустимую величину.

Структура разработанной методики описывается блок-схемой, представленной на рисунке 1. Описание исходных данных, неизвестных переменных и расчетных характеристик, учитываемых в рамках разработанной методики, представлено в таблицах № 1 и 2.

е
п
а
р
а
м
е
т
р
о
в

β_0 – целесообразно осуществлять с использованием метода наименьших квадратов в рамках процедуры многофакторной линейной

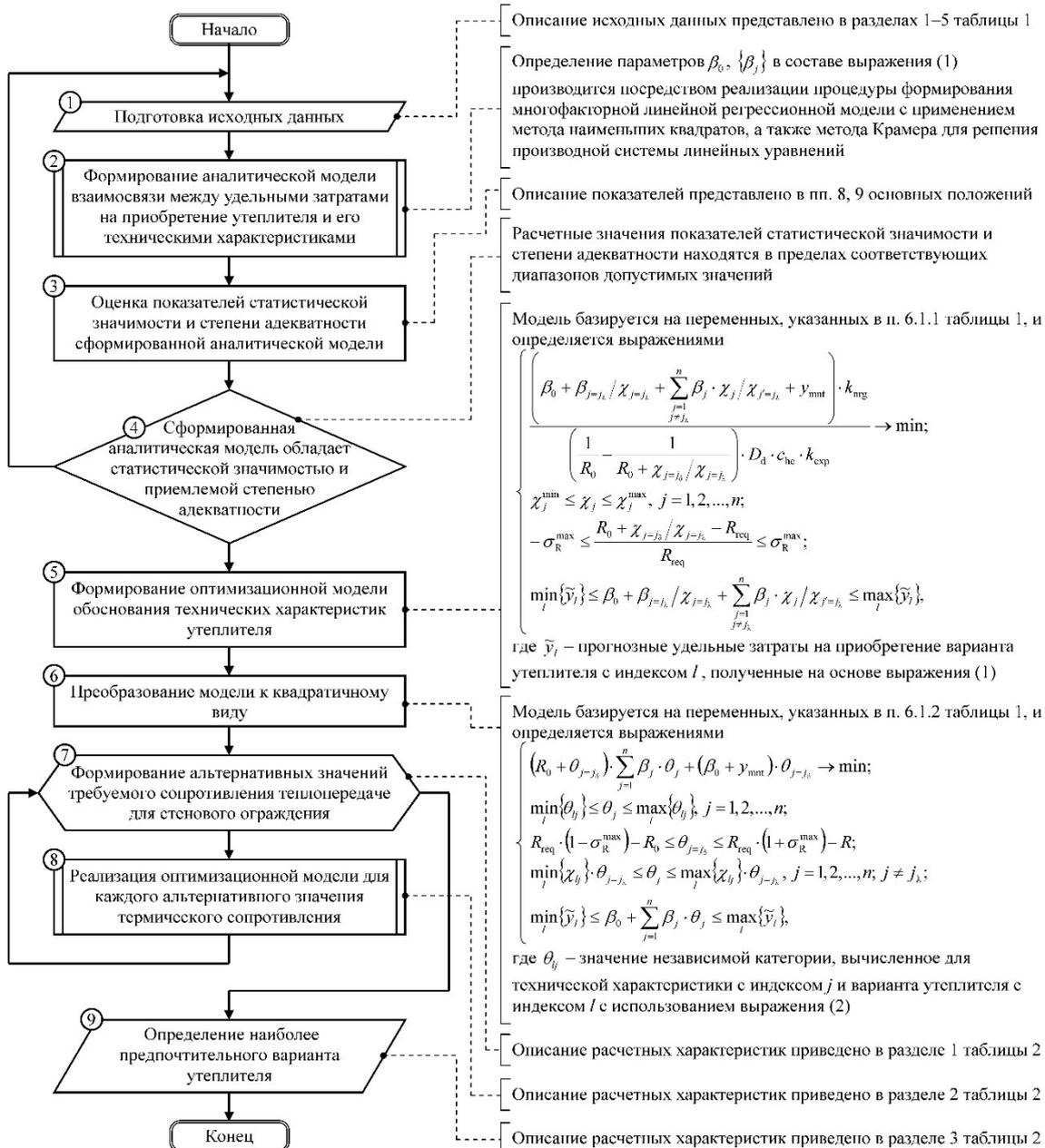


Рис. 1. Блок-схема, описывающая структуру разработанной методики
 Fig. 1. – Block diagram describing the structure of the developed procedure

Таблица 1. Исходные данные и неизвестные переменные, учитываемые в рамках разработанной методики
 Table 1. Initial data and unknown variables taken into account within the developed procedure

№ п.п.	Наименование элемента исходных данных	Ед. изм.	Обознач-е / выражение
1	2	3	4
1	Индексы		
1.1	Индекс технической характеристики утеплителя ^(1)	-	$j = 1, 2, \dots, n$
1.2	Индекс параметра, соответствующего коэффициенту теплопроводности утеплителя	-	$j_\lambda \in \{1, 2, \dots, n\}$
1.3	Индекс параметра, соответствующего толщине утеплителя	-	$j_\delta \in \{1, 2, \dots, n\}$
1.4	Индекс варианта утеплителя ^(2)	-	$l = 1, 2, \dots, g$
1.5	Индекс вычислительного эксперимента ^(3)	-	$p = 1, 2, \dots, z$
1.6	Индекс критерия выбора наиболее предпочтительного варианта утеплителя ^(4)	-	$h = 1, 2, \dots, u$

2	Исходные данные, используемые при формировании взаимосвязи между удельными затратами на приобретение утеплителя и его техническими характеристиками		
2.1	Общие исходные данные		
2.1.1	Количество технических характеристик утеплителя	ед.	n
2.1.2	Количество вариантов утеплителя	ед.	g
2.2	Исходные данные, задаваемые для каждого отдельного варианта утеплителя с индексом l ($l = 1, 2, \dots, g$)		
2.2.1	Наименование варианта утеплителя	-	-
2.2.2	Фактические удельные затраты на приобретение утеплителя	руб./м ²	y_l
2.3	Исходные данные, задаваемые для каждого отдельного варианта утеплителя с индексом l ($l = 1, 2, \dots, g$) в части каждой технической характеристики материала с индексом j ($j = 1, 2, \dots, n$)		
2.3.1	Значение технической характеристики утеплителя	EI_{χ_j}	χ_{lj}
3	Исходные данные, используемые при формировании оптимизационной модели обоснования технических характеристик утеплителя ^(7)		
3.1	Общие исходные данные		
3.1.1	Исходное значение сопротивления теплопередаче для стенового ограждения ^(8)	м ² ·°C/Вт	R_0
3.1.2	Требуемое значение сопротивления теплопередаче для стенового ограждения ^(9)	м ² ·°C/Вт	R_{req}
3.1.3	Максимальное относительное отклонение фактического значения сопротивления теплопередаче для стенового ограждения от требуемого значения	-	σ_R^{max}
3.1.4	Удельные затраты на монтаж утеплителя	руб./м ²	y_{mt}
3.1.5	Тариф на использование тепловой энергии	руб./Гкал	c_{he}
3.1.6	Показатель градусо-суток отопительного периода ^(8)	°C·сут.	D_d
3.1.7	Коэффициент пересчета энергетических единиц измерения	Вт·ч/Гкал	k_{nrg}
3.1.8	Коэффициент пересчета временных единиц измерения	ч/сут.	k_{exp}
4	Исходные данные, используемые при планировании последовательности процедур построения и реализации оптимизационной модели		
4.1	Общие исходные данные		
4.1.1	Шаг изменения требуемого значения сопротивления теплопередаче для стенового ограждения	м ² ·°C/Вт	Δ_R
5	Исходные данные, используемые при определении наиболее предпочтительного варианта утеплителя ^(9)		
5.1	Общие исходные данные		
5.1.1	Количество критериев выбора наиболее предпочтительного варианта утеплителя ^(10)	ед.	u
5.1.2	Нормативное значение сопротивления теплопередаче для стенового ограждения	м ² ·°C/Вт	R_{norm}
6	Неизвестные переменные		
6.1	Неизвестные переменные, учитываемые по отношению к каждой отдельной технической характеристике утеплителя с индексом j ($j = 1, 2, \dots, n$)		
6.1.1	Значение технической характеристики утеплителя	EI_{χ_j}	χ_j
6.1.2	Значение независимой категории (в составе аналитической модели взаимосвязи между удельными затратами на приобретение утеплителя и его техническими характеристиками), соответствующей технической характеристике утеплителя ^(5)	EI_{θ_j}	θ_j

Примечание:

- (1) верхнее значение индекса определяется элементом исходных данных п. 2.1.1 таблицы;
- (2) верхнее значение индекса определяется элементом исходных данных п. 2.1.2 таблицы;
- (3) верхнее значение индекса определяется элементом исходных данных п. 5.1.1 таблицы;
- (4) верхнее значение индекса определяется элементом исходных данных п. 1.2.3 таблицы 2;
- (5) взаимосвязь с переменной п. 6.1.1 таблицы описывается выражением (2).

Таблица 2. Расчетные характеристики, вычисляемые в рамках разработанной методики
Table 2. Design characteristics calculated within the developed procedure

№ п.п.	Наименование расчетной характеристики	Ед. изм.	Выражение
1	2	3	4
1	Расчетные характеристики, вычисляемые при формировании последовательности вычислительных экспериментов		
1.1	Расчетные характеристики, вычисляемые для каждого отдельного варианта утеплителя с индексом l ($l=1,2,\dots,g$)		
1.1.1	Сопротивление теплопередаче для стенового ограждения	$\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$	$R_l = R_0 + \theta_{l=j_s}$
1.2	Обобщенные расчетные характеристики		
1.2.1	Предельное значение требуемого сопротивления теплопередаче для стенового ограждения	минимальное ^(1)	$R_{\text{req}}^{\text{min}} = \left[\frac{\min \{R_l\}}{\Delta_R} \right] \cdot \Delta_R$
1.2.2		максимальное ^(2)	$R_{\text{req}}^{\text{max}} = \left[\frac{\max \{R_l\}}{\Delta_R} \right] \cdot \Delta_R$
1.2.3	Количество вычислительных экспериментов	ед.	$z = \frac{R_{\text{req}}^{\text{max}} - R_{\text{req}}^{\text{min}}}{\Delta_R} + 1$
1.3	Расчетные характеристики, формируемые для каждого отдельного вычислительного эксперимента с индексом p ($p=1,2,\dots,z$)		
1.3.1	Альтернативное значение требуемого сопротивления теплопередаче для стенового ограждения ^(3)	$\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$	$R_{\text{req}p} = R_{\text{req}}^{\text{min}} + (p-1) \cdot \Delta_R$
2	Расчетные характеристики, формируемые по результатам реализации каждого отдельного вычислительного эксперимента с индексом p ($p=1,2,\dots,z$)		
2.1.1	Значение каждой неизвестной переменной с индексом j ($j=1,2,\dots,n$) в найденном оптимальном решении	$ЕИ_{\theta_j}$	θ_{pj}^{opt}
2.1.2	Значение целевой функции, соответствующее найденному оптимальному решению	руб. $\cdot \text{°C}/\text{Вт}$	Θ_p^{opt}
3	Расчетные характеристики, вычисляемые при определении наиболее предпочтительного варианта утеплителя		
3.1	Расчетные характеристики, вычисляемые по отношению к каждому отдельному вычислительному эксперименту с индексом p ($p=1,2,\dots,z$)		
3.1.1	Оптимальное значение технической характеристики утеплителя с индексом j ($j=1,2,\dots,n$)	$ЕИ_{\chi_j}$	$\chi_j^{\text{opt}} = \begin{cases} \theta_j^{\text{opt}}, & j = j_\lambda; \\ \theta_{j=j_\lambda}^{\text{opt}}, & j \neq j_\lambda. \end{cases}$
3.1.2	Срок окупаемости реализуемого проектного решения (критерий с индексом $h=1$)	ед.	$Q_{h=1,p} = \frac{R_0 \cdot k_{\text{нрг}}}{c_{\text{he}} \cdot D_d \cdot k_{\text{exp}}} \times \frac{\Theta_p^{\text{opt}} + R_0 \cdot (\beta_0 + y_{\text{нт}})}{\theta_{pj=j_s}^{\text{opt}}}$
3.1.3	Абсолютное отклонение фактического значения сопротивления теплопередаче для стенового ограждения от нормативного значения (критерий с индексом $h=2$)	$\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$	$Q_{h=2,p} = R_0 + \theta_{pj=j_s}^{\text{opt}} - R_{\text{норм}} $
3.1.4	Нормированное значение каждого отдельного критерия выбора варианта утеплителя с индексом h ($h=1,2,\dots,u$) ^(4)	-	$Q_{hp}^N = \frac{Q_{hp} - Q_h^{\text{worst}}}{Q_h^{\text{best}} - Q_h^{\text{worst}}}$
3.1.5	Значение комплексного критерия (показателя предпочтительности) ^(5)	-	$Q_p^{N\Sigma} = \sum_{h=1}^u w_h \cdot Q_{hp}^N$
3.2	Расчетные характеристики, вычисляемые для каждого критерия выбора варианта утеплителя с индексом h ($h=1,2,\dots,u$)		

3.2.1	Экстремальное значение критерия	наиболее предпочтительное	-	$Q_h^{\text{best}} = \min_p \{Q_{hp}\}$
3.2.2		наименее предпочтительное	-	$Q_h^{\text{worst}} = \max_p \{Q_{hp}\}$
3.2.3	Балансировочный весовой коэффициент значимости учета критерия		м ² ·°C/Вт	$w_h = \frac{z - \sum_{p=1}^z Q_{hp}^N}{u \cdot z - \sum_{h=1}^u \sum_{p=1}^z Q_{hp}^N}$
3.3	Расчетные характеристики, вычисляемые для каждого отдельного варианта утеплителя с индексом l ($l = 1, 2, \dots, g$)			
3.3.1	Срок окупаемости реализуемого проектного решения (критерий с индексом $h = 1$)		ед.	$Q_{h=1,l} = \frac{k_{\text{nr}}}{D_d \cdot c_{\text{he}} \cdot k_{\text{exp}}} \times \left(\beta_0 + \sum_{j=1}^j \beta_k \cdot \theta_{lj} + y_{\text{mnt}} \right) \times \left(\frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_0 + \theta_{lj=j_s}} \right)$
3.3.2	Абсолютное отклонение фактического значения сопротивления теплопередаче для стенового ограждения от нормативного значения (критерий с индексом $h = 2$)		м ² ·°C/Вт	$Q_{h=2,l} = R_0 + \theta_{lj=j_s} - R_{\text{norm}} $
3.3.3	Нормированное значение каждого отдельного критерия выбора экземпляра теплоизоляционного материала с индексом h ($h = 1, 2, \dots, u$)		-	$Q_{hl}^N = \frac{Q_{hl} - Q_h^{\text{worst}}}{Q_h^{\text{best}} - Q_h^{\text{worst}}}$
3.3.4	Значение комплексного критерия (показателя предпочтительности)		-	$Q_l^{N\Sigma} = \sum_{h=1}^u w_h \cdot Q_{hl}^N$
3.4	Агрегированные расчетные характеристики			
3.4.1	Индекс вычислительного эксперимента с наиболее предпочтительным результатом		-	$p^{\text{best}} : Q_{p=p^{\text{best}}}^{N\Sigma} = \max_p \{Q_p^{N\Sigma}\}$
3.4.2	Индекс наиболее предпочтительного варианта утеплителя		-	$l^{\text{best}} : Q_{l=l^{\text{best}}}^{N\Sigma} = \max_l \{Q_l^{N\Sigma}\}$

Примечание:

- (1) обозначение [...] в составе математического выражения определяет результат округления соответствующего значения до ближайшего большего целого;
- (2) обозначение [...] в составе математического выражения определяет результат округления соответствующего значения до ближайшего меньшего целого;
- (3) значение расчетной характеристики присваивается элементу исходных данных, определяемому п. 3.1.2 таблицы 1 ($R_{\text{req}} = R_{\text{req},p}$), непосредственно перед каждой отдельной реализацией модифицированной оптимизационной модели.
- (4) вычисление расчетной характеристики производится после вычисления характеристик пп. 3.2.1 и 3.2.2 таблицы;
- (5) вычисление расчетной характеристики производится после вычисления характеристики п. 3.2.3 таблицы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для объективной оценки практической значимости разработанного инструментального средства в рамках заключительных этапов исследования была произведена реализация разработанной методики на практическом примере для следующих значений основных исходных данных: $R_0 = 1,073$ м²·°C/Вт; $y_{\text{mnt}} = 1,073$ руб./м²; $c_{\text{he}} = 1,073$ руб./Гкал; $D_d = 1,073$

°C·сут.; $k_{\text{nr}} = 1163000$ кВт·ч/Гкал; $k_{\text{exp}} = 24$ ч/сут. При этом в качестве дополнительных технических характеристик утеплителя рассматривались следующие: толщина, средняя плотность, водопоглощение за 24 часа (по объему), индекс группы горючести. Минимальное и максимальное значения требуемого сопротивления теплопередаче для стенового ограждения, вычисленные на основе предварительно подготовленной выборки вариантов утеплителя, составили соответственно 1,74 м²·°C/Вт и 3,93

$\text{м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$. Шаг изменения требуемого значения сопротивления теплопередаче для стенового ограждения при выполнении вычислительных экспериментов был принят равным $0,01 \text{ м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$. Нормативное значение сопротивления теплопередаче принималось равным $3,08 \text{ м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$. В процессе реализации методики было использовано следующее программное обеспечение: «Microsoft Excel» – для задания исходных данных и анализа результатов реализации

оптимизационной модели; программное обеспечение «Matlab» – непосредственно для построения и реализации оптимизационной модели. Графическое описание результатов выполнения вычислительных экспериментов – зависимость значения срока окупаемости конструктивного решения в оптимальном решении оптимизационной модели от значения требуемого сопротивления теплопередаче для стенового ограждения – представлены на рисунке 1.

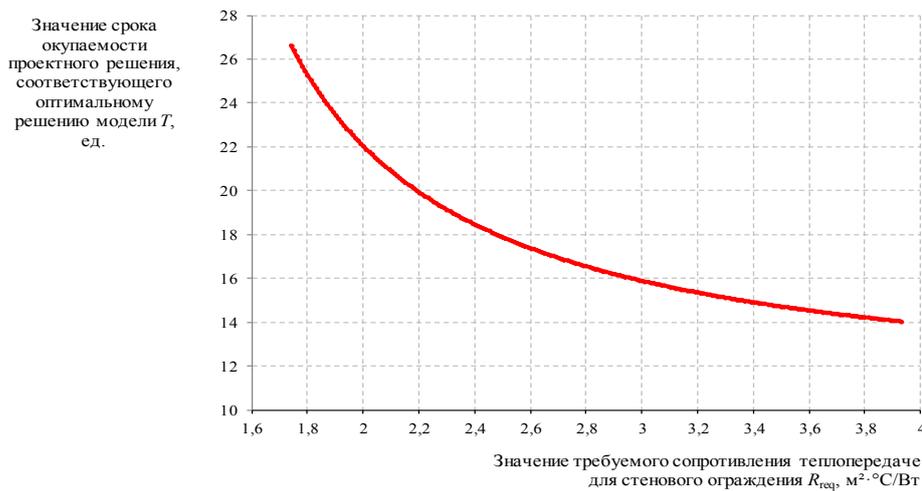


Рис. 2. Графическое описание результатов выполнения вычислительных экспериментов в рамках реализации методики на практическом примере (иллюстрация авторов)

Fig. 2. Graphic interpretation of the completed calculating experiments results as part of the method realization by practical example (illustration by the authors)

Как видно из рисунка, упомянутая зависимость имеет гиперболический характер, обусловленный более высокой скоростью роста экономии периодических затрат на отопление здания в сравнении с ростом капитальных затрат на реализацию конструктивного решения при увеличении требуемого значения сопротивления теплопередаче для стенового ограждения. В процессе реализации методики был выбран наиболее предпочтительный вариант утеплителя. На основе полученных результатов был сделан вывод о высокой практической значимости разработанного инструментального средства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в рамках исследования были получены следующие результаты:

1. Выполнен обзор и сравнительный анализ научных разработок в области обоснования характеристик теплоизоляционных материалов в составе стеновых ограждений в рамках жилых зданий. По результатам выполнения указанной процедуры выявлены недостатки существующих инструментальных средств для решения соответствующих прикладных задач.

2. Разработана методика обоснования характеристик утеплителя в составе ограждающей

конструкции с использованием средств квадратичной оптимизации. Методика предполагает выполнение серии вычислительных экспериментов для объективной оценки значимости критериев обоснования наиболее предпочтительного варианта утеплителя..

3. Разработанная методика была реализована на практическом примере. На основе полученных результатов сделан вывод о высокой практической значимости разработанного инструментального средства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горшков, А.С. Анализ действующих требований и методик по тепловой защите зданий / А.С. Горшков, С.В. Корниенко // Энергосбережение. – 2018. – №3. – С. 28-37.

2. Горшков, А.С. Замечания и предложения по корректировке свода правил «Тепловая защита зданий» / А.С. Горшков, С.В. Корниенко // Кровельные и изоляционные материалы. – 2018. – № 5. – С. 42-47.

3. Горшков, А.С. Предложения по совершенствованию нормативных требований к ограждающим конструкциям / А.С. Горшков // Строительные материалы, оборудование,

технологии XXI века. 2017. – № 1-2 (216-217). – С. 49-52.

4. Крышов, С.И. О фактических показателях энергоэффективности зданий. Причины и пути устранения несоответствия нормативам / С.И. Крышов, И.С. Курилук // Энергосбережение. – 2018. – № 4. – С. 38-45.

5. Стахов, А. Е. Экономическая оценка конструктивных решений тепловой защиты зданий / А. Е. Стахов, А. А. Андреев // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. – 2018. – № 4. – С. 42-47. – EDN UQQGPG.

6. Ковалев, И. Н. Особенности оптимизации толщины утеплителя наружных стен зданий. Системные аспекты / И. Н. Ковалев, Ю. А. Табунщиков // Энергосбережение. – 2017. – № 8. – С. 22-32. – EDN ZUGGLL.

7. Мальцев А.Н. Определение оптимальной степени усиления элементов теплозащитной оболочки малоэтажных жилых домов / А.Н. Мальцев // Инженерный вестник Дона. - 2021. - №7.

8. Окунев А.Ю. Оптимизация утепления наружных стен на примере частных жилых домов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. Т. 21. № 1. С. 126–139.

9. Increasing the Energy Efficiency of Ventilated Facades Using Different Insulators / D. Kraynov, G. Medvedeva, R. Sadykov, A. Ibragimova // Proceedings of STCCE : International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering 2022 : Lecture Notes in Civil Engineering, Kazan, 21–29 апреля 2022 года. Vol. 291. – Switzerland: Springer Nature, 2022. – P. 299-309. – DOI 10.1007/978-3-031-14623-7_26. – EDN PPGKMS.

10. Крайнов, Д. В. Сравнение оконных блоков по светотехническим и теплотехническим параметрам / Д. В. Крайнов, Д. Р. Гарифуллина // Экологическая безопасность и устойчивое развитие урбанизированных территорий : Сборник докладов II Международной научно-практической конференции, Нижний Новгород, 23–25 апреля 2019 года / Редколлегия: А.А. Лапшин [и др.]. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 2019. – С. 313-317. – EDN CUBZOE.

11. Крайнов, Д. В. Теплопоступление и теплопотери через стеклопакеты / Д. В. Крайнов, А. О. Салеева // Экологическая безопасность и устойчивое развитие урбанизированных территорий : Сборник докладов II Международной научно-практической конференции, Нижний Новгород, 23–25 апреля 2019 года / Редколлегия: А.А. Лапшин [и др.]. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 2019. – С. 347-351. – EDN DRMZSA.

12. Крайнов, Д. В. Расчет приведенного сопротивления теплопередачи светопрозрачных конструкций из алюминиевых профилей / Д. В. Крайнов, И. А. Масленников // Известия Казанского

государственного архитектурно-строительного университета. – 2020. – № 4(54). – С. 35-43. – EDN KRRCUK.

13. Liu H., Maghoul P., Shalaby A. Optimum insulation design for buried utilities subject to frost action in cold regions using the Nelder-Mead algorithm // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019. (130). С. 613 639. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.10.107

14. Hoffmann C., Geissler A. The prebound-effect in detail: Real indoor temperatures in basements and measured versus calculated U-values // Energy Procedia. 2017. (122). С. 32-37. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.07.301

15. Kraynov, D. Research of thermal performance properties of the wall construction products made of materials using heat power engineering waste / D. Kraynov, G. Medvedeva // E3S Web of Conferences Volume 274 (2021) : 2nd International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering (STCCE - 2021), Kazan, 21–28 апреля 2021 года. Vol. 274. – France: EDP Sciences, 2021. – P. 7001. – DOI 10.1051/e3sconf/202127407001. – EDN YMXDFC.

16. Numerical simulation of ventilated facades under extreme climate conditions / M. R. Petrichenko, E. V. Kotov, D. V. Nemova [et al.] // Magazine of Civil Engineering. – 2018. – No. 1(77). – P. 130-140. – DOI 10.18720/MCE.77.12. – EDN XPKZPN.

17. Гамаюнова О.С. Обоснование характеристик многослойной стеновой конструкции с использованием средств квадратичного программирования / А.Е. Радаев, О.С. Гамаюнова // Строительство и техногенная безопасность. 2021. №22(74). С. 111-127.

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

19. Радаев, А.Е. Использование средств оптимизационного моделирования для обоснования характеристик энергоэффективного конструктивного решения / А. Е. Радаев, О. С. Гамаюнова, Г. А. Бардина // Строительство и техногенная безопасность. – 2022. – № 27(79). – С. 5-25. – EDN EXVSFS.

REFERENCES

1. Gorshkov A.S., Kornienko S.V. Analysis of current requirements and methods for thermal protection of buildings. – 2018. – №3. P. 28-37.

2. Gorshkov A.S., Kornienko S.V. Remarks and Suggestions for Correction of the Code of Rules "Thermal Protection of Buildings" / A.S. Gorshkov, S.V. Kornienko // Roofing and Insulation Materials. – 2018. – № 5. P. 42-47.

3. Gorshkov, A.S. Proposals for the improvement of regulatory requirements for enclosing constructions / A.S. Gorshkov // Construction materials, equipment, technologies of the XXI century. 2017. – № 1-2 (216-217). P. 49-52.

4. Kryshov, S.I. On Actual Indicators of Energy Efficiency of Buildings. Causes and ways of eliminating non-compliance with standards / S.I. Kryshov, I.S. Kurylyuk // *Energy saving*. – 2018. – № 4. P. 38-45.
5. Stakhov A. E., Andreenko A. A. Ekonomicheskie otsenka konstruktivnykh resheniya teplovoy zashchita zdvizheniya [Economic assessment of constructive solutions of thermal protection of buildings] / A. E. Stakhov, A. A. Andreenko // *AVOK: Ventilation, heating, air conditioning, heat supply and construction thermophysics*. – 2018. – № 4. P. 42-47. – EDN UQQGPG.
6. Kovalev, I. N. Features of Optimization of Thickness of Insulation of External Walls of Buildings. Sistemnye aspekty / I. N. Kovalev, Y. A. Tabunshchikov // *Energoberezhenie [Energy saving]*. – 2017. – № 8. P. 22-32. – EDN ZUGLL.
7. Maltsev A.N. Opredelenie optimal'noy speneniya elementov teplozashchitel'noy oshell [Determination of the optimal degree of strengthening the elements of the heat protective shell of low-rise residential houses] / A.N. Maltsev // *Inzhenernyy vestnik Dona*. - 2021. - №7.
8. Okunev A.Y. Optimization of Insulation of External Walls on the Example of Private Residential Houses // *Bulletin of the Tomsk State Architectural and Construction University*. 2019. T. 21. № 1. Pp. 126–139.
9. Increasing the Energy Efficiency of Ventilated Facades Using Different Insulators / D. Kraynov, G. Medvedeva, R. Sadykov, A. Ibragimova // *Proceedings of STCCE : International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering 2022 : Lecture Notes in Civil Engineering, Kazan, 21–29 апреля 2022 года*. Vol. 291. – Switzerland: Springer Nature, 2022. – P. 299-309. – DOI 10.1007/978-3-031-14623-7_26. – EDN PPGKMS.
10. Kraynov D. V., Garifullina D. R. Ekologicheskaya bezopasnosti i ustoychivogo razvitie urbanizatsionnykh territorii: Sbornik dokladov II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Nizhny Novgorod, 23–25 april 2019 goda / Editorial board: A.A. Lapshin [i dr.]. Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, 2019. P. 313-317. – EDN CUBZOE.
11. Kraynov D. V., Saleeva A. O. Teploposteniya i teplopoterya perez glazoponoky [Heat Supply and Heat Loss through Double-glazed Windows] / D. V. Kraynov, A. O. Saleeva // *Ekologicheskaya bezopasnosti i ustoychivogo razvitie urbanizatsionnykh territorii: Sbornik dokladov II Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoy konferentsii, Nizhny Novgorod, 23–25 april 2019 goda [Electronic Safety and Sustainable Development of Urbanized Territories: Collection of Reports of the II International Scientific and Practical Conference, Nizhny Novgorod, 23–25 April 2019]*. Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, 2019. P. 347-351. – EDN DRMZSA.
12. Krainov D. V., Maslennikov I. A. Raschet priducennogo protivnosti teplopredstavleniya translucenitnykh konstrukttsii iz aluminivnykh profili [Calculation of the reduced resistance of heat transfer of translucent structures from aluminum profiles] / D. V. Kraynov, I. A. Maslennikov // *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. – 2020. – № 4(54). P. 35-43. – EDN KRRCUK.
13. Liu H., Maghoul P., Shalaby A. Optimum insulation design for buried utilities subject to frost action in cold regions using the Nelder-Mead algorithm // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019. (130). C. 613-639. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.10.107
14. Hoffmann C., Geissler A. The prebound-effect in detail: Real indoor temperatures in basements and measured versus calculated U-values // *Energy Procedia*. 2017. (122). C. 32-37. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.07.301
15. Kraynov, D. Research of thermal performance properties of the wall construction products made of materials using heat power engineering waste / D. Kraynov, G. Medvedeva // *E3S Web of Conferences Volume 274 (2021) : 2nd International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering (STCCE - 2021), Kazan, 21–28 апреля 2021 года*. Vol. 274. – France: EDP Sciences, 2021. – P. 7001. – DOI 10.1051/e3sconf/202127407001. – EDN YMXDFC.
16. Numerical simulation of ventilated facades under extreme climate conditions / M. R. Petrichenko, E. V. Kotov, D. V. Nemova [et al.] // *Magazine of Civil Engineering*. – 2018. – No. 1(77). – P. 130-140. – DOI 10.18720/MCE.77.12. – EDN XPKZPN.
17. Gamayunova O.S. Justification of the characteristics of multi-layer wall construction with the use of quadratic programming tools / A.E., Radaev, O.S. Gamayunova // *Stroitelstvo i tekhnosfermaya bezopasnost'*. 2021. №22(74). P. 111-127.
18. Gamayunova O.S. Justification of the cost of insulation from their thermophysical characteristics // *Construction of unique buildings and structures*. 2019. № 1 (76). P. 19-29.
19. Radaev A.E., Gamayunova O.S., Bardina G.A. Ispol'zovanie sredstva optimizatsionnogo modelirovaniya dlya osnovaniyu kharakteristiki energoturnocheskogo konstruktivnogo resheniya [Use of means of optimization modeling for the justification of the characteristics of an energy efficient constructive solution]. – 2022. – № 27(79). P. 5-25. – EDN EXVSFS.

PROCEDURE FOR DETERMINATION OF THE CHARACTERISTICS FOR THE HEAT-
INSULATING MATERIAL AS PART OF THE ENCLOSING STRUCTURE
WITH THE USE OF QUADRATIC OPTIMIZATION TOOLS

Olekhnovich¹ Ya. A., Radaev¹ A. E.

¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russian Federation
E-mail: ¹oyanis@list.ru; ²radaev_ae@spbstu.ru

Abstract: Relevance of the research is connected to the importance of the problems related to the determination of the characteristics for structural solutions used in the construction or reconstruction of buildings and structures (taking into account the indicators of energy and economic efficiency), as well as the relatively low practical significance of the relevant scientific developments.

Problem statement. It is necessary to determine the most preferred variant (model) of heat-insulating material used as an additional layer in the wall structure on the basis of the criteria related to the provided heat transfer resistance and the payback period of the corresponding design solution.

Research aim. Development of tools for determination of the characteristics for thermal insulation material as part of wall structure within a residential building.

Research tasks are the following: 1. Review and comparative analysis of scientific developments in the field of research. 2. Development of the procedure for determination of the characteristics for the heat-insulating material as part of the wall structure with the use of quadratic optimization tools. 3. Implementation of the developed procedure on a practical example.

Results. Procedure for determination of the characteristics for the heat-insulating material as part of the wall structure with the use of quadratic optimization tools has been developed. The procedure has been implemented using a practical example, and the received results have been analyzed.

Findings. The results of the procedure's implementation on a practical example confirm the high practical significance of the developed tool. Thus, quadratic optimization tools can be effectively used to solve the problem related to the determination of the characteristics for heat-insulating material as part of an wall structure.

Key words: wall structure, optimization model, energy efficiency, thermal insulation material, heat transfer resistance, material's characteristics.