

Метод определения стратегии утепления строительных конструкций

С.Ю. Кадокова, И.В. Федорова

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный
университет

Аннотация: На фоне ужесточения требований по сокращению затрат на производство и эксплуатацию строительной продукции рассматривается вариант технических решений по утеплению строительных конструкций. Проанализированы литературные источники, фундаментальные и современные, освещающие вопросы тепловой защиты зданий; обстоятельств, влияющих на величину срока окупаемости инвестиционных энергосберегающих строительных проектов; примеры экономической оценки энергосберегающих мероприятий. Вычислены тепловые потери через рассматриваемую конструкцию – покрытие. Построены графики теплопотерь для различных сочетаний устройства «покрытие – окна». Намечены варианты утепления: по нормативным требованиям, по критерию минимизации объемов работ. Проведен экономический анализ выбранных вариантов.

Ключевые слова: тепловые потери, функция полезности тепловой изоляции, кривые безразличия, бюджетное уравнение.

Законодательные и нормативные акты РФ рекомендуют сокращать затраты на производство и эксплуатацию строительной продукции, в частности – зданий жилого, общественного и промышленного назначения. Расходы на их отопление определяются величиной суммарных трансмиссионных потерь тепловой энергии через строительные конструкции: стены, покрытия, перекрытия, окна, витражи, балконные и наружные двери. Вопросам тепловой защиты зданий посвящены фундаментальные работы: как учебные [1–3], так и научные [4].

Инженерной задачей проектировщика является выбор такого сопротивления теплопередаче проектируемого ограждения здания, которое не только удовлетворяло бы санитарным нормам по обеспечению требуемой температуры внутренних поверхностей ограждений, но и сохраняло максимально возможное количество тепловой энергии в отопительный период. В качестве экономического критерия оценки принятых решений в вышеуказанных источниках рассматривалась минимизация сроков

окупаемости капитальных вложений в устройство тепловой защиты стен, покрытий, полов; в изготовление энергосберегающих светопрозрачных конструкций с теплоотражающими покрытиями, с заполнением стеклопакетов инертными газами; в техническое перевооружение тепловых пунктов зданий. Все эти энергосберегающие мероприятия должны уменьшать расход тепловой энергии на отопление зданий и соответствующие денежные расходы потребителей.

Значительное влияние на величину срока окупаемости инвестиционных энергосберегающих строительных проектов (ИЭСП) оказывает фактическая инфляция, уменьшающая покупательную способность денежных средств и, соответственно, увеличивающая время возврата первоначальных капитальных вложений. Методология учета таких обстоятельств рассматривается, в частности, в [5, 6].

С другой, технической стороны, каждый дополнительный слой теплоизоляции, каждый дополнительный конструктивный элемент, например, терmostатический клапан, приносит все меньший эффект. В таких случаях говорят об уменьшении полезности предлагаемых проектных решений при увеличении капитальных затрат на их реализацию. Вопросам оценки полезности энергосберегающих мероприятий посвящен ряд журнальных публикаций [7–9].

Исходя из вышесказанного актуальной становится экономическая оценка энергосберегающих мероприятий, т. е. текущий и перспективный анализ стоимости тепловой энергии, стоимости выполнения строительно-монтажных работ, величины эксплуатационных затрат на обслуживание технически сложных энергосберегающих устройств (систем рекуперации, автоматического регулирования, теплонасосных установок) и недолговечных по сравнению со сроками жизненного цикла несущих строительных

конструкций и элементов здания (тепловая изоляция, пластмассовые трубопроводы).

Такая оценка, в частности, дается в [10–12]. Она основана на построении графоаналитической модели, представляющей собой поле линий безразличия, характеризующее множество возможных вариантов тепловых потерь в зависимости от значений коэффициентов сопротивления теплопередаче как светопрозрачных конструкций $R_{\text{свт}}$ так и стен $R_{\text{ст}}$, и покрытий $R_{\text{п}}$, которые нормируются в СП 50.13330.

Рассмотрим задачу утепления существующего покрытия спортивного комплекса ($F = 2880 \text{ м}^2$) с коэффициентом остекления $f = 0,2$. Тепловые потери через покрытие определим по (1):

$$Q = (t_{\text{в}} - t_{\text{н}}) \left(\frac{F_{\text{п}}}{R_{\text{п}}} + \frac{F_{\text{свт}}}{R_{\text{свт}}} \right), \quad (1)$$

где $t_{\text{в}}$, $t_{\text{н}}$ – температуры внутреннего и наружного воздуха, $^{\circ}\text{C}$; $F_{\text{п}}$, $F_{\text{свт}}$ – площади покрытий и светопрозрачных конструкций, м^2 ; $R_{\text{п}}$, $R_{\text{свт}}$ – значения сопротивлений теплопередаче покрытий и окон, $(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})/\text{Вт}$.

Подставляя нормативные значения $R_{\text{п}} = 4,2 \text{ (м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})/\text{Вт}$ и $R_{\text{свт}} = 0,4 \text{ (м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})/\text{Вт}$; $F_{\text{п}} = 2880 \cdot 0,8 = 2304 \text{ м}^2$ и $F_{\text{свт}} = 576 \text{ м}^2$ в (1), получаем величину нормативных тепловых потерь через покрытие спортивного зала:

$$Q_{\text{норм}} = (18 - (-24)) \left(\frac{2304}{4,2} + \frac{576}{0,4} \right) = 83520 \text{ Вт.}$$

Для дальнейшего анализа необходимо построить так называемое поле кривых, характеризующих интенсивность тепловых потерь Q в зависимости от величин $R_{\text{п}}$ и $R_{\text{свт}}$. Для этого примем значения $R_{\text{свт}}$ светопрозрачных конструкций равным 0,4; 0,5; 0,6 $(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})/\text{Вт}$ и, задаваясь величинами теплопотерь, ориентируясь на нормативное теплопотребление, по формуле (1) вычислим соответствующие значения $R_{\text{п}}$ покрытия стадиона. Результаты

расчета приведены в табл. 1, графики «линий безразличия» теплопотерь при различных сочетаниях $R_{\text{п}}$ и $R_{\text{свт}}$ показаны на рис. 1.

Из графиков видно, что по мере увеличения $R_{\text{п}}$ приходится увеличивать слой изоляции все больше и больше ($\Delta R_1 < \Delta R_2 < \Delta R_3 < \Delta R_4 < \Delta R_5 < \Delta R_6$), т. е. «полезность» каждого сантиметра теплового слоя уменьшается.

Таблица 1

Расчет сопротивления теплопередаче покрытия $R_{\text{п}}$, ($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)/ Вт

Q , Вт	70000	80000	90000	100000	110000	120000	130000	140000
$R_{\text{свт}}$, ($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)/ Вт	10,16	4,95	3,28	2,45	1,95	1,62	1,4	1,22
0,4	4,47	3,06	2,32	1,87	1,57	1,35	1,19	1,06
0,6	3,20	2,44	1,97	1,62	1,39	1,21	1,08	0,97

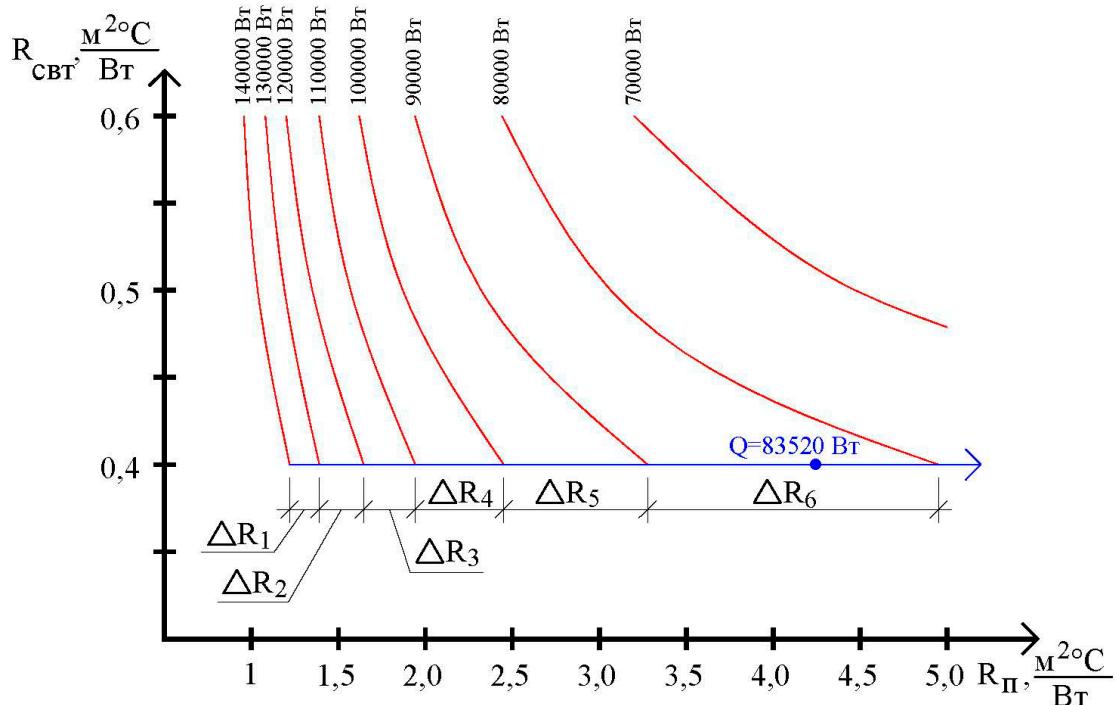


Рис. 1. – Теплопотери через покрытие при сочетании значений $R_{\text{п}}$ и $R_{\text{свт}}$

Проанализируем полученные графики с целью выбора стратегии утепления ограждающей конструкции. В качестве начального теплотехнического состояния покрытия примем $R_{\Pi} = 1,4 \text{ (м}^2\cdot\text{°C)}/\text{Вт}$, $R_{\text{свт}} = 0,4 \text{ (м}^2\cdot\text{°C)}/\text{Вт}$, теплопотери оцениваются как $Q_0 \approx 130 \text{ кВт}$. Для перехода от этой точки к нормативной кривой можно изменить только R_{Π} , оставив светопрозрачные конструкции без изменений, либо – одновременно R_{Π} и $R_{\text{свт}}$, установив однокамерные стеклопакеты.

Функция $Q = f(R_{\Pi}, R_{\text{свт}})$ представляет собой криволинейную поверхность. Кратчайший спуск из начальной точки ($R_{\text{свт}} = 0,4 \text{ (м}^2\cdot\text{°C)}/\text{Вт}$, $R_{\Pi} = 1,4 \text{ (м}^2\cdot\text{°C)}/\text{Вт}$) будет приводить нас к уменьшению тепловых потерь через кровлю с минимальными приращениями ΔR_{Π} и $\Delta R_{\text{свт}}$. Не вдаваясь в математические выкладки, т. к. точность в расчетах не необходима, определим траекторию линии оптимальных решений (рис. 2).

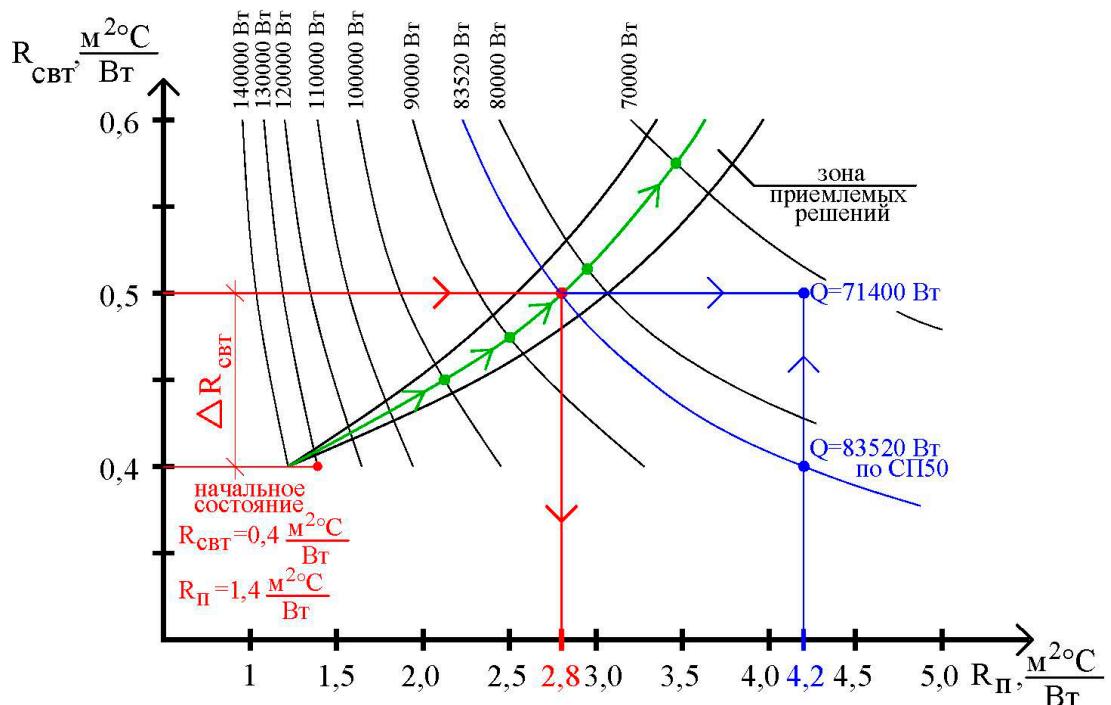


Рис. 2. – Определение стратегии утепления покрытия

Минимальные расходы на светопрозрачные конструкции определяются проектированием однокамерного стеклопакета в оконных конструкциях покрытия ($R_{\text{свт}} = 0,5 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)}/\text{Вт}$). Само покрытие утепляется слоем негорючей минераловатной плиты типа «Rockwool» толщиной 60 мм. Промежуточный вывод таков: нормативные тепловые потери в 83 кВт достигаются превышением $R_{\text{свт}}$ над требуемыми по СП 50.13330 и недобором до $R_{\text{п}} = 4,2 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)}/\text{Вт}$, т. е. нормативный документ требует добавить еще 56 мм минеральной ваты.

В реальном проекте, который используется для иллюстрации представленного метода определения стратегии утепления строительной конструкции, заложен слой тепловой изоляции толщиной 200 мм с сопротивлением теплопередаче $R_{\text{ут}} = 0,2/0,04 = 5,0 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)}/\text{Вт}$. Теплопотери уменьшатся на 16 кВт, а толщина слоя утеплителя увеличится в 3,3 раза. Соответственно возрастут и затраты: энергетические, денежные и на производство теплоизолирующих материалов и изделий из них, на их монтаж и эксплуатацию. Следует заметить, что срок службы минераловатной плиты хоть и декларируется в 50 лет, однако зависит от тепло-влажностного климатического режима в регионе строительства, качества монтажа и эксплуатационных работ. Оценке энергетических затрат посвящена работа [13]. В представленной статье этот аспект не рассматривается.

Экономическим же методам принятия решений по использованию инвестиционных денежных средств для энергосберегающих технологий в строительстве посвящено множество печатных трудов. Кроме вышеперечисленных можно указать на работу [14], посвященную экономической оценке внутренней теплоизоляции, что актуально для зданий, попадающих под охранный архитектурный статус. Экономический и энергетический анализ модернизации зданий с использованием внутренней

изоляции с точки зрения зарубежных исследователей приведен в работах [15, 16].

В нашем случае для энергосберегающих решений, используют анализ бюджетного уравнения:

$$C = P_x \cdot x + P_y \cdot y, \quad (2)$$

где C – объем денежных средств, р.; P_x, P_y – стоимости единицы товара, р.; x, y – количество товара.

Графически это линия, описываемая выражением:

$$y = \frac{C}{P_y} - \frac{P_x}{P_y} \cdot x, \quad (3)$$

Поскольку выше речь идет о тепловой изоляции покрытия и установке стеклопакетов, уравнение (2) можно записать как:

$$V \cdot P_1 + F_{\text{свт}} \cdot P_2 = C, \quad (4)$$

где V – объем изоляционного материала, м^3 ; P_1 – сметная стоимость монтажа 1 м^3 изоляции, р./м^3 ; $F_{\text{свт}}$ – площадь светопрозрачных конструкций, м^2 ; P_2 – стоимость 1 м^2 оконного блока, р./м^2

Выражение (4) не имеет в своем составе величин $R_{\text{п}}$ и $R_{\text{свт}}$, упоминаемых ранее. Запишем первое слагаемое в виде $F_{\text{п}} \cdot \delta \cdot P_1$, а учитывая, что $R = \delta / \lambda$, – в виде $F_{\text{п}} \cdot R \cdot \lambda \cdot P_1$. Второе слагаемое можно записать, используя корреляционную зависимость стоимости проектных светопрозрачных конструкций от величины их приведенного сопротивления, например $P_2 = 2500 + 2630 \cdot R_{\text{свт}}$. Тогда формула (4) примет вид более удобный для практического использования:

$$F_{\text{п}} \cdot R_{\text{п}} \cdot P_1 \cdot \lambda + F_{\text{свт}} \cdot (2500 + 2630R_{\text{свт}}) = C. \quad (5)$$

Подставим в это выражение наши исходные данные: $F_{\text{п}} = 2304 \text{ м}^2$; $F_{\text{свт}} = 576 \text{ м}^2$; $R_{\text{свт}} = 0,4 \text{ (м}^2\cdot\text{°C)}/\text{Вт}$, $R_{\text{п}} = 4,2 \text{ (м}^2\cdot\text{°C)}/\text{Вт}$; $P_1 \approx 2000 \text{ р./м}^3$; $P_2 = 2500 + 2630 \cdot 0,4 = 3552 \text{ р./м}^3$.

Тогда общая стоимость устройства покрытия по «нормативу» для $Q = 83520 \text{ Вт}$ составит: $C_1 = 2304 \cdot 4,2 \cdot 2000 \cdot 0,04 + 576 \cdot 3762 = 2820096 \text{ р.}$

Этот первый вариант предполагает устройство окон по начальному варианту и усиление теплоизолирующих свойств покрытия $R_{\text{п}}$ с 1,4 до 4,2 $(\text{м}^2\cdot\text{°C})/\text{Вт}$.

Вторым вариантом предполагается увеличить сопротивление теплопередаче окон на 0,1 $(\text{м}^2\cdot\text{°C})/\text{Вт}$ до $R_{\text{свт}} = 0,5 \text{ (м}^2\cdot\text{°C)}/\text{Вт}$, а сопротивление теплопередаче покрытия $R_{\text{п}}$ с 1,4 до 2,8 $(\text{м}^2\cdot\text{°C})/\text{Вт}$. Стоимость второго варианта оценим как: $C_2 = 2304 \cdot 2,8 \cdot 2000 \cdot 0,04 + 576(2500 + 2630 \cdot 0,5) = 2713536 \text{ р.}$

Третьим вариантом при $R_{\text{свт}} = 0,5 \text{ (м}^2\cdot\text{°C)}/\text{Вт}$ увеличиваем сопротивление теплопередаче покрытия $R_{\text{п}}$ с 2,8 до 4,2 $(\text{м}^2\cdot\text{°C})/\text{Вт}$. Стоимость этого варианта: $C_3 = 2304 \cdot 4,2 \cdot 2000 \cdot 0,04 + 576(2500 + 2630 \cdot 0,5) = 2971584 \text{ р.}$

Третий вариант по сравнению с предыдущим является выигрышным по теплопотерям $\Delta Q = 83520 - 71400 = 12120 \text{ Вт (10420 ккал/ч)}$. В год эта экономия составит для 208 суток отопительного периода примерно 24 Гкал. Сопоставляя фактические сметные стоимости теплоизоляционных и оконных работ с ожидаемым сокращением энергозатрат, учитывая коэффициент дисконтирования, действующую ставку банковского кредита, можно оценить выгодность рассматриваемых вариантов утепления конструкции здания.

Выводы

1. Утепление строительных конструкций (покрытий, окон) с целью сокращения теплопотребления здания возможно несколькими способами.

2. Для реализации этих вариантов необходимо построить график функции $Q = f(R_{\text{п}}, R_{\text{свт}})$.

3. Оптимальная траектория приемлемых решений определяется методом «скорейшего спуска».

4. Экономическая оценка рассматриваемых стратегий реализации ИЭСП осуществляется путем составления бюджетного уравнения с использованием текущих цен на устройство теплоизоляционных и светопрозрачных конструкций, а также с учетом стоимости гигакалории тепловой энергии в каждом конкретном случае.

Литература

1. Богословский В.Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха). СПб. АВОК Северо-Запад, 2000. 400 с.

2. Савин В.К. Строительная физика: энергоперенос, энергоэффективность, энергосбережение. М.: Лазурь, 2005. 432 с.

3. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / Под ред. Ю. А. Табунщикова, В. Г. Гагарина. 5-е изд. М.: АВОК-ПРЕСС, 2006. 256 с.

4. Самарин О.Д. Теплофизика. Энергосбережение. Энергоэффективность: монография. М.: АСВ, 2011. 296 с.

5. Дмитриев А.Н., Табунщикова, Ковалев И.Н., Шилкин Н.В. Руководство по оценке экономической эффективности инвестиций в энергосберегающие мероприятия. М.: АВОК-ПРЕСС, 2005. 120 с.

6. Горшков А.С. Разработка научных и методологических принципов повышения эффективности использования энергетических ресурсов на предприятиях текстильной и легкой промышленности и снижения энергоемкости выпускаемой продукции: дис. ... док. техн. наук / Горшков

Александр Сергеевич; Санкт-Петербург, гос. ун-т пром. технол. и дизайна. СПб, 2019. 32 с.

7. Табунщиков Ю.А. Энергосбережение и энергоэффективность – мировая проблема полезности // Энергосбережение. 2010. № 6. С. 40-45.
 8. Андреенко А. А. Управление энергосбережением – аспект предельной полезности // Энергосбережение. 2018. № 6. С. 20-23.
 9. Иванова Ю.В., Федорова И.В., Кадокова С.Ю. Методы повышения тепловой защиты стеновых конструкций зданий // Инженерный вестник Дона. 2023. №6 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2023/8497.
 10. Стахов А.Е., Кадокова С.Ю., Андреенко А.А. Оценка конструктивных решений по тепловой защите зданий экономическими методами // Вестник гражданских инженеров. 2018. № 3(68). С. 219-222.
 11. Стахов А.Е., Фролькис В.А., Кадокова С.Ю., Андреенко А.А. Экономико-математический анализ тепловой защиты зданий // Вестник гражданских инженеров. 2019. № 4(75). С. 107-112.
 12. Стахов А.Е., Кадокова С.Ю., Андреенко А.А. Методы управления инвестиционными энергосберегающими проектами // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 4(81). С. 252-256.
 13. Стахов А.Е., Андреенко А.А. Энергетическая оценка решений тепловой защиты с позиции жизненного цикла зданий // АВОК. 2020. № 4. С. 56-59.
 14. Федорова И.В., Кадокова С.Ю. Особенности технико-экономической оценки проектов по внутреннему утеплению стеновых конструкций // Инженерный вестник Дона. 2025. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2025/9990.
 15. Basińska M., Kaczorek D., Koczyk H. Economic and Energy Analysis of Building Retrofitting Using Internal Insulations // Energies. 2021, 14(9), 2446.
-

16. Kazaz1 A., Yetim E. A research on the determination of optimum thermal insulation thickness and cost analysis in buildings // Conference: 3rd International Civil Engineering and Architecture Congress (ICEARC'23). Trabzon, Türkiye October 2023. DOI:10.31462/icearc.2023.cme112.

References

1. Bogoslovskiy V.N. Stroitel'naya teplofizika (teplofizicheskie osnovy otopleniya, ventilyatsii i konditsionirovaniya vozdukh) [Building thermal physics (thermophysical principles of heating, ventilation and air conditioning)]. SPb.: AVOK Severo-Zapad, 2000. 400 s.
2. Savin V.K. Stroitel'naya fizika: energoperenos, energoeffektivnost', energosberezhenie [Building physics: energy transfer, energy efficiency, energy conservation]. M.: Lazur', 2005. 432 p.
3. Fokin K.F. Stroitel'naya teplotekhnika ogranichayushchikh chastei zdaniy [Thermal engineering of building envelopes]. Pod red. Yu. A. Tabunshchikova, V. G. Gagarina. 5-e izd. M.: AVOK-PRESS, 2006. 256 p.
4. Samarin O.D. Teplofizika. Energosberezhenie. Energoeffektivnost': monografiya [Thermal physics. Energy conservation. Energy efficiency]. M.: ASV, 2011. 296 p.
5. Dmitriev A.N., Tabunshchikov, Kovalev I.N., Shilkin N.V. Rukovodstvo po otsenke ekonomiceskoy effektivnosti investitsiy v energosberegayushchie meropriyatiya [Guidelines for assessing the economic efficiency of investments in energy saving measures]. M.: AVOK-PRESS, 2005. 120 p.
6. Gorshkov A.S. Razrabotka nauchnykh i metodologicheskikh printsipov povysheniya effektivnosti ispol'zovaniya energeticheskikh resursov na predpriyatiyakh tekstil'noy i legkoy promyshlennosti i snizheniya energoemkosti vypuskaemoy produktsii: dis. ... dok. tekhn. nauk [Development of scientific and

methodological measures to reduce the efficiency of resource use in textile and light industry enterprises and to reduce the energy intensity of manufactured products]/ Gorshkov Aleksandr Sergeevich; Sankt-Peterburg, gos. un-t prom. tekhnol. i dizayna. SPb, 2019. 32 p.

7. Tabunshchikov Yu.A. Energosberezhenie. 2010. № 6. pp. 40-45.
8. Andreenko A. A. Energosberezhenie. 2018. № 6. pp. 20-23.
9. Ivanova Yu.V., Fedorova I.V., Kadokova S.Yu. Inzhenernyj vestnik Dona. 2023. №6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2023/8497.
10. Stakhov A.E., Kadokova S.Yu., Andreenko A.A. Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. 2018. № 3(68). pp. 219-222.
11. Stakhov A.E., Frol'kis V.A., Kadokova S.Yu., Andreenko A.A. Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. 2019. № 4(75). pp. 107-112.
12. Stakhov A.E., Kadokova S.Yu., Andreenko A.A. Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. 2020. № 4(81). pp. 252-256.
13. Stakhov A.E., Andreenko A.A. AVOK. 2020. № 4. pp. 56-59.
14. Fedorova I.V., Kadokova S.Yu. Inzhenernyj vestnik Dona. 2025. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2025/9990.
15. Basińska M., Kaczorek D., Koczyk H. Energies. 2021, 14(9), 2446. doi.org/10.3390/en14092446.
16. Kazaz1 A., Yetim E. Conference: 3rd International Civil Engineering and Architecture Congress (ICEARC'23). Trabzon, Türkiye October 2023. DOI:10.31462/icearc.2023.cme112.

Авторы согласны на обработку и хранение персональных данных.

Дата поступления: 11.11.2025

Дата публикации: 25.12.2025