

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

УДК 692.232:69.003.13

DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-1-126-139

А.Ю. ОКУНЕВ,

Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН

ОПТИМИЗАЦИЯ УТЕПЛЕНИЯ НАРУЖНЫХ СТЕН НА ПРИМЕРЕ ЧАСТНЫХ ЖИЛЫХ ДОМОВ

Рассмотрена задача минимизации расходов на утепление и эксплуатацию здания. Для проведения исследования получена формула оптимальной толщины утепления в виде решения квадратного уравнения с параметрами, учитывающими стоимость: производства теплоты, утепления, фасадов, системы отопления, потерь, связанными с расходованием денежных средств. С целью получения необходимого набора исходных данных проанализирована динамика индекса потребительских цен и стоимости энергоносителей для населения. Исследование проведено на примере Москвы и Московской области. Рассмотрены случаи вновь возводимых зданий как с однослойными, так и многослойными стенами, рассмотрен также случай утепления здания на стадии ремонта/реконструкции. Полученные оптимальные значения сопротивления теплопередаче от варианта к варианту меняются как значительно ниже, чем по СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий», так и выше в зависимости от конкретной задачи.

Ключевые слова: теплопотери; энергоэффективность; утепление; ограждающие конструкции.

Для цитирования: 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.

A.Yu. OKUNEV,

Research Institute of Building Physics Raacs, State University of Farming

OPTIMIZATION OF EXTERNAL WALL INSULATION IN PRIVATE BUILDINGS

The paper deals with minimization of cost expenses on insulation and operation of buildings. The thickness of thermal insulation of enclosure structures are calculated using the proposed quadratic equation with cost parameters, such as heat production, heat insulation, facades, heating system, and cost expenses. The dynamics of the consumer price index and the cost of energy carriers for the population are analyzed in order to obtain the necessary set of initial data. The study is conducted on the example of Moscow and the Moscow region. Newly erected buildings, both with single-layer and multi-layer walls are considered as well as the building insulation at a stage of repair or reconstruction. The obtained optimum values of the

heat resistance vary several times, both significantly lower and higher than the standard values depending on the specific task.

Keywords: heat loss; energy efficiency; insulation; enclosure structure.

For citation: Okunev A.Yu. Optimizatsiya utepleniya naruzhnykh sten na primere chastnykh zhilykh domov [Optimization of external wall insulation in private buildings]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2019. V. 21. No. 1. Pp. 126–139.

Введение

В настоящее время становятся все более востребованными и актуальными здания с высокими теплозащитными свойствами ограждающих конструкций с целью минимизации теплопотерь через них и соответственного снижения эксплуатационных затрат на отопление и кондиционирование таких зданий. При этом исследования в данной области проводятся преимущественно для многоквартирных жилых [1], административных и промышленных зданий. Однако минимизация теплопотерь означает в том числе увеличение толщины утепления наружных стен, что связано с дополнительными капитальными затратами. Соответственно, существует оптимальное утепление, при котором достигаются суммарные затраты на возведение и эксплуатацию.

В рамках настоящей работы проведено исследование по оптимизации утепления наружных стен на примере частных жилых домов [2].

Для начала определим, согласно СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02–2003», нормируемые параметры и основные исходные данные. Ограничимся примером г. Москвы и Московской области.

Для этого региона согласно СП 131.13330.2012 «Строительная климатология»:

- продолжительность периода со среднесуточной температурой не выше $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $z = 205$ сут;
- средняя наружная температура отопительного периода – $\tau_{\text{нар}} = -2,2\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- наружная температура холодной пятидневки с обеспеченностью 0,92 $\tau_5 = -25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

При температуре внутреннего воздуха ($\tau_{\text{внутр}}$), постоянной по всему зданию и равной $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$, количество градусо-суток отопительного периода (ГСОП) составит 4551.

Обращаясь к СП «Тепловая защита зданий», получаем следующие базовые значения требуемого сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций ($\text{m}^2 \cdot \text{C}/\text{Вт}$):

стены.....	3,0
покрытия и перекрытия над проездами.....	4,5
перекрытия чердачные, над неотапливаемыми подпольями и подвалами.....	3,9
окна, балконные двери, витрины, витражи.....	0,49
фонари.....	0,36

Теплопотери в жилом здании включают в себя: трансмиссионные, на вентиляцию, на горячее водоснабжение. Все эти теплопотери между собой складываются, частично или полностью компенсируются тепlopоступлениями от бытовых приборов, включая осветительные, от людей и от солнца с получением необходимых затрат теплоты на эксплуатацию здания.

В случае высокой маневренности системы отопления, что достижимо в частном доме, снижение каждого из перечисленных каналов теплопотерь приводит к соответственной экономии энергоносителей. Таким образом, можно рассматривать каждый канал теплопотерь по отдельности друг от друга, находя оптимальные решения. Данный принцип – разделяемости теплопотерь – положен в основу описанной ниже оптимизации и позволяет находить отдельные проектные решения, не рассматривая каждый раз полный тепловой баланс здания.

Для определения оптимальной толщины утепления стен использованы следующие положения:

1. Рассматривается доутепление некоторой стены с известным приведенным (базовым) сопротивлением теплопередаче.

2. Стоимость мероприятий по утеплению пропорциональна толщине утепления за вычетом стоимости подготовительных и фасадных работ, не зависящих от толщины утепления.

3. Известна минимальная величина между сроком службы здания и сроком службы утепления.

4. Известна величина эффективного коэффициента теплопроводности утепленного слоя с учетом неоднородностей конструкции («мостиков холода»), и она не зависит от толщины утепления.

5. Расчеты проводятся в рублях с постоянным и известным снижением покупательной способности (годовой инфляции).

6. Стоимость системы отопления пропорциональна мощности и известна. Известен также срок службы системы отопления.

7. Известна стоимость производства тепловой энергии, ежегодное подорожание которой также известно и постоянно.

8. Стоимость тепла не может превысить определенный порог, например, стоимости электроэнергии, т. к. становится целесообразным переход на этот вид теплоснабжения для конечного пользователя.

9. Капитальные затраты характеризуются не только их полным расходом за срок службы (потери на амортизацию), но и утерянной выгодой/выплатами по кредитам (потери на процентах).

10. Оптимизация осуществляется поиском минимума суммарных затрат с учетом перечисленных факторов.

1. Описание параметров

R_0 – базовое сопротивление теплопередаче стены, $\text{м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$. Данная величина зависит от выбранного в качестве базового варианта стен. Если речь идет о возведении нового строения с однослойными стенами без дополнительного утепления и внутренней отделки на отnose, то величину R_0 можно принимать равной $R_0 = 1/\alpha_{\text{внутр}} + 1/\alpha_{\text{нар}}$, где по СП 50.13330.2012 $\alpha_{\text{внутр}} =$

$= 8,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$, $\alpha_{\text{нар}} = 23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$ – коэффициенты теплоотдачи внутреннему и наружному воздуху. В итоге в данном случае $R_0 = 0,16 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{С}/\text{Вт}$.

$s_{\text{ут}}$ – удельная стоимость утепления, руб./м³. Данная величина складывается из нескольких параметров: стоимости утеплителя, стоимости конструктивных элементов, расположенных в зоне утепления, стоимости проведения работ по утеплению.

$S_{\text{фас}}$ – стоимость мероприятий по подготовке стен и изготовлению фасадов, руб./м². Данная стоимость включает в себя все мероприятия по утеплению, не вошедшие в $s_{\text{ут}}$.

$\lambda_{\text{эфф}}$ – эффективный коэффициент теплопроводности утепленного слоя, Вт/(м·К). Данный параметр определяется расчетом или на основании экспериментальных исследований. В расчете применяется постоянное значение этого параметра, что весьма ограничено допустимо на практике, т. к. с увеличением толщины утепления итоговые затраты теплоты через ограждения меняются нелинейно – увеличивается вклад различных теплопроводных включений, оконных откосов и пр. Возможно ступенчатое изменение конструкции с увеличением толщины. Следует понимать, что постоянство $\lambda_{\text{эфф}}$ возможно лишь с некоторой точностью и в ограниченном диапазоне толщин утепления. Однако если величины $\lambda_{\text{эфф}}$ и R_0 известны вблизи оптимума по толщине, то оптимизация остается реализуемой.

$I_{\text{инфл}}$ – скорость инфляции, %/год. Скорость инфляции принимается постоянной и известной. Так как речь идет о частном домостроении, то инфляцию можно оценивать по росту индекса потребительских цен на товары и услуги. Сведения по изменению данного индекса собираются и обрабатываются Федеральной службой государственной статистики (Росстат). Официальные данные по индексу приведены на рис. 1. В дальнейшем в расчетах взято среднее значение роста индекса потребительских цен за период 2000–2014 гг., равное 11,4 %.

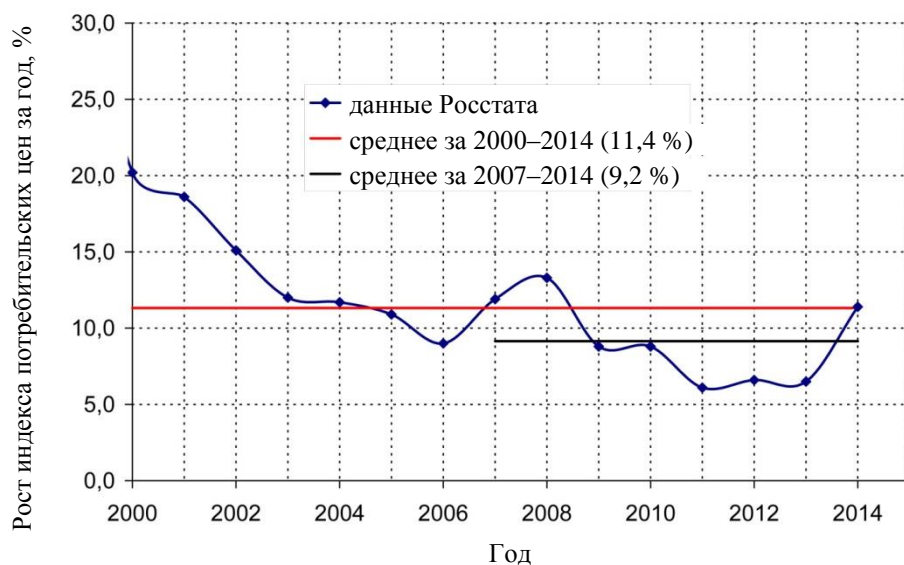


Рис. 1. Рост индекса потребительских цен с 2000 по 2015 г.

$I_{\text{тепл}}$ – скорость подорожания теплоты, %/год. В рамках настоящей работы рассмотрены следующие источники теплоты для отопления: магистральный газ, электричество, дрова, уголь, дизель. Цены на газ взяты на основании постановления РЭК «Об установлении розничных цен на природный газ, реализуемый населению города Москвы» по годам. Данные приведены на рис. 2. На графике приведены две аппроксимации синим и красным цветом, соответствующие постоянному годовому подорожанию энергоресурса. В дальнейшем для расчетов взята меньшая из величин годового увеличения цены – 18 %.

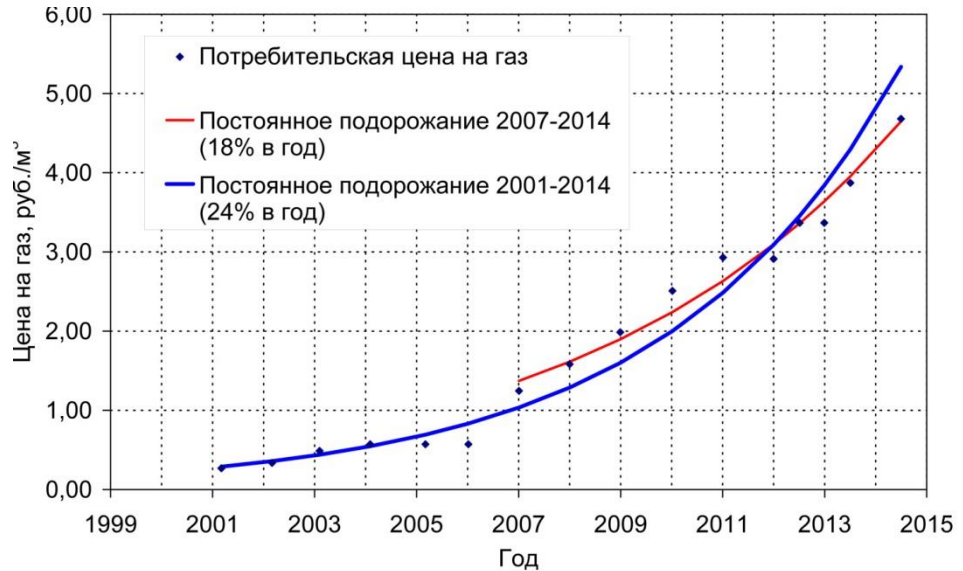


Рис. 2. Динамика изменения цены на магистральный газ для населения с 2000 по 2015 г. Исходные данные – постановления РЭК

На рис. 3 приведены данные по электроэнергии для Москвы. Как и в случае с газом, видно, что аппроксимация постоянным годовым подорожанием за весь период не дает удовлетворительного совпадения в отличие от более короткого периода. Красная аппроксимация соответствует подорожанию 16,2 %/год, зеленая – 11 %/год. В дальнейшем будет взята в расчетах величина, равная инфляции (11,4 %/год), как более близкая.

Аналогичным образом, по данным Росстата, проанализированы цены на каменный уголь, дрова и дизель. Установлено, что в период 2007–2015 гг. скорость подорожания данных энергоресурсов не выше 11,4 %.

Для рассмотренных типов энергоносителей получены следующие величины текущей цены 1 кВт·ч теплоты (ξ) и скорости подорожания за вычетом средней инфляции (индекса потребительских цен), принимаемой 11,4 %/год ($\sigma_{\text{тепл}}$). Принимается, что стоимость любого энергоносителя в ценах текущего года не может снижаться:

- природный газ: 4,68 руб./м³, $\sigma_{\text{тепл}} = 6,6$ %/год;
- электроэнергия: одноставочный тариф 3,28 руб./(кВт·ч), $\sigma_{\text{тепл}} = 0$ %/год;

- электроэнергия: двухставочный тариф, постоянное использование 2,59 руб./($\text{kBt}\cdot\text{ч}$), $\sigma_{\text{тепл}} = 0 \text{ \%/год}$;
- электроэнергия: двухставочный тариф, отопление по ночному тарифу 0,88 руб./($\text{kBt}\cdot\text{ч}$), $\sigma_{\text{тепл}} = 0 \text{ \%/год}$;
- каменный уголь: 6128 руб/т, $\sigma_{\text{тепл}} = 0 \text{ \%/год}$;
- дрова: 1561 руб/ м^3 , $\sigma_{\text{тепл}} = 0 \text{ \%/год}$;
- дизельное топливо 33,5 руб/л, $\sigma_{\text{тепл}} = 0 \text{ \%/год}$.

Из представленных результатов можно видеть, что только природный газ обладает явной тенденцией к подорожанию со скоростью, превышающей инфляцию.

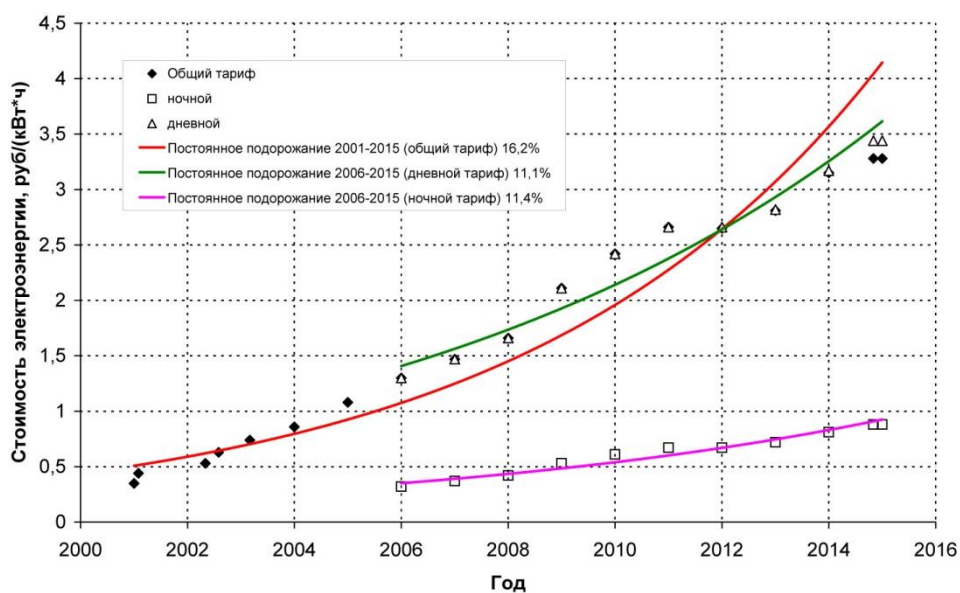


Рис. 3. Динамика изменения цены на электроэнергию для населения с 2001 по 2015 г. Исходные данные – постановления РЭК

Полученные данные необходимо привести к стоимости получаемой теплоты с помощью данных энергоносителей.

Природный газ. Низшая теплота сгорания газа по ГОСТ 5542–87 «Газы горючие природные для промышленного и коммунально-бытового назначения» составляет не менее 31,8 МДж/ м^3 при 20 °С, 101,325 кПа. Примем, что котел удовлетворяет ГОСТ 20548–87 «Котлы отопительные водогрейные теплопроизводительностью до 100 кВт. Общие технические условия» и имеет КПД на уровне 90 %, что соответствует техническим характеристикам большей части продаваемых установок. Отсюда стоимость одного кВт·ч по состоянию на апрель 2015 г. для потребителей г. Москвы в целях отопления и иных бытовых нужд составляет 0,59 руб./($\text{kBt}\cdot\text{ч}$).

Каменный уголь. Для частного отопления чаще применяется уголь марки Д (длиннопламенный). Низшая теплота сгорания такого угля находится в интервале 4700–5300 ккал/кг. Таким образом, можно принять среднюю теп-

лотворную способность угля на уровне $5000 \text{ ккал/кг} = 5,81 \text{ кВт}\cdot\text{ч/кг}$. КПД котлов на твердом топливе, включая каменный уголь, ниже газовых и обычно находится на уровне 80 % и выше (по ГОСТ 20548–87 не ниже 71–76 %). Отсюда стоимость одного кВт·ч при отоплении каменным длиннопламенным углем составляет 1,32 руб./(кВт·ч).

Дрова. На основании литературных данных нетрудно получить, что теплотворная способность сухих дров из сосны составляет $2100 \text{ кВт}\cdot\text{ч/м}^3$ и для березы $2600 \text{ кВт}\cdot\text{ч/м}^3$. Данные Росстата по текущей цене на дрова – 1561 руб/м^3 . Отсюда, принимая КПД котла, как и для угля, равным 80 %, имеем стоимость теплоты, получаемой путем сжигания данного вида топлива, равной 1,04 руб./(кВт·ч).

Дизельное топливо. Низшая теплота сгорания дизельного топлива, согласно [3], составляет $42,62 \text{ МДж/кг}$. Плотность дизельного топлива находится на уровне 850 кг/м^3 . Коэффициент полезного действия при сжигании в специализированном котле выше, чем для твердых топлив, и соизмерим с КПД газовых котлов. Отсюда стоимость 1 кВт·ч, полученного путем сжигания данного вида топлива, составляет 3,14 руб./(кВт·ч).

Полученные данные по стоимости теплоты из различных энергоносителей приведены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнительная таблица различных способов отопления

Вид энергоносителя	Стоимость одного кВт·ч теплоты по состоянию на начало 2015 г. ξ , руб.	Скорость подорожания в ценах текущего года $\sigma_{\text{тепл}}$, %/год
Магистральный газ, Москва	0,59	6,6
Уголь длиннопламенный, Московская область	1,32	0
Дрова березовые колотые, Московская область	1,04	0
Электроэнергия по одноставочному тарифу, Москва	3,28	0
Электроэнергия по двухставочному тарифу, Москва	2,59	0
Электроэнергия по двухставочному тарифу при использовании для отопления только ночью, Москва	0,88	0
Дизельное топливо, Московская область	3,14	0

$\sigma\%$ – годовые потери на проценты в ценах текущего года. Капитальные затраты на утепление здания и на оснащение системой отопления у частных лиц связаны с тратами имеющихся накоплений или расходованием заемных средств. Предположим, что конкретное частное лицо пользуется услугами какого-то банка для сбережения средств и этого же или другого банка для

пользования кредитами. Пусть, например, вложения банк у него принимает под 15 % годовых, а кредиты выдает под 20 % годовых. Тогда, например, если у данного лица есть все имеющиеся средства на капитальные затраты, то вместо того, чтобы положить в банк под проценты, он тратит их на строительство. Ограничимся случаем, в котором ставка рефинансирования ЦБ равна инфляции, в этом случае в ценах текущего года данное лицо теряет $(15-11,4)0,87\% = 3,1\%$ от суммы ежегодно за счет упущенной выгоды.

Рассмотрим второй случай. Пусть данный человек взял кредит под 20 % годовых и выплачивает кредит равными частями в течение 5 лет, при этом выплаты комиссии банку за пользование заемными средствами уменьшаются ежемесячно.

Для того чтобы разобраться, чему же равен параметр $\sigma\%$, в данном случае потребуется также значение упущенной выгоды, полученное ранее, и срок службы здания/утепления ($L_{зд}$), например, равный 50 лет. Расчет ведется следующим образом:

- ежемесячно рассчитываются суммарные выплаты по кредиту в ценах начального года;
- рассчитывается утерянная выгода по накопленным суммарным выплатам к данному месяцу;
- по окончании кредитного периода определяется суммарная выплата в ценах начального года и рассчитывается по годам утерянная выгода от этой суммы в течение всего периода $L_{зд}$;
- суммарная упущенная выгода складывается с разницей между общими выплатами и занимаемой суммой и делится на $L_{зд}$.

По рассмотренному примеру суммарная выплата по кредиту составила 1,195 от занимаемой суммы (суммы капитальных затрат), утерянная выгода – 1,883 от суммы капитальных затрат. Итого:

$$\sigma\% = (1/50)(1,883 + 0,195)100\% = 4,2\%.$$

Примеры результатов расчетов $\sigma\%$ при различных сроках кредита, сроках службы здания и процентных ставках приведены в табл. 2. Можно заметить, что в большинстве случаев значение $\sigma\%$ значительно ниже ставки кредита за вычетом инфляции. Данный факт связан с тем, что $L_{зд}$ часто превышает период кредитования, в результате утепление может оказаться целесообразным даже при невыполнении критерия оценки окупаемости инвестиций, полученного в работе [4].

Таблица 2

Результаты расчетов значений $\sigma\%$

Инфляция, %/год	Ставка по вкладу, % годовых	Ставка по кредиту 12.%(мес.), %	Срок кредита, лет	Срок службы здания/утепления, лет	$\sigma\%$, %
11,4	15	20	5	50	4,2
11,4	15	30	5	50	5,3
11,4	15	20	5	20	4,8
11,4	15	20	20	50	6,4
11,4	15	15	20	50	4,9

Окончание табл. 2

Инфляция, %/год	Ставка по вкладу, % годовых	Ставка по кредиту 12.% (мес.), %	Срок кредита, лет	Срок службы здания/утепления, лет	$\sigma\%$, %
11,4	7	15	20	20	-3,7
5	8	10	10	100	3,4
11,4	15	30	1	5	5,4
11,4	15	30	1	50	3,6

Из данных в таблице видно, что $\sigma\%$ заметным образом зависит от всех используемых параметров. При этом в случае если ставка по вкладу ниже инфляции, то $\sigma\%$ может быть отрицательной, т. к. ценность инвестиций в утепление здания падает в течение времени медленнее, чем ценность денег в таком вкладе.

2. Расчет оптимального утепления

Для того чтобы построить функцию, которую будем оптимизировать по затратам, сначала распишем расходы за год эксплуатации одного квадратного метра стены:

$$E = \frac{24z(\tau_{\text{внутр}} - \tau_{\text{нар}})}{1000 \left(R_0 + \frac{\delta}{\lambda_{\text{эфф}}} \right)} \xi + (S_{\text{фас}} + \delta S_{\text{ут}}) \left(\sigma\% + \frac{1}{L_{\text{зд}}} \right) + \frac{(\tau_{\text{внутр}} - \tau_5)}{1000 \left(R_0 + \frac{\delta}{\lambda_{\text{эфф}}} \right)} S_{\text{от}} \left(\sigma\% + \frac{1}{L_{\text{от}}} \right). \quad (1)$$

Здесь δ – толщина дополнительного утепления стены, м; $L_{\text{от}}$ – срок службы системы отопления.

Первое слагаемое (1) отвечает за затраты средств на отопление, второе слагаемое – за амортизацию утепления и потери на процентах, связанных с капитальными затратами на утепление, третье – за амортизацию системы отопления и потери на процентах, связанных с капитальными затратами на отопление. Как было сказано ранее, в зависимости от постановки задачи отдельные параметры следует принимать равными нулю.

Параметр ξ (стоимость одного кВт·ч теплоты) в формуле (1) изменяется от значения ξ_0 с постоянным подорожанием, не превышая при этом ξ_{max} , и для i -го года начиная со следующего после расчетного может быть записан в виде

$$\xi_i = \begin{cases} a_i, & \text{если } a_i < \xi_{\text{max}}; \\ \xi_{\text{max}}, & \text{если } a_i \geq \xi_{\text{max}}, \end{cases} \quad (2)$$

где $a_i = \xi_0 (1 + \sigma_{\text{тепл}})^i$.

Из результатов анализа выше данное изменение следует в первую очередь учитывать для отопления магистральным газом, при этом величину ξ_{max} можно брать исходя из наиболее целесообразного энергоносителя на замену магистрального газа в каждом конкретном случае.

Слагаемые $\frac{1}{L_{\text{зд}}}$ и $\frac{1}{L_{\text{от}}}$ (амортизация) характеризуют капитальные затраты на утепление и систему отопления. Таким образом, при суммировании за-

трат за весь период эксплуатации $L_{зд}$ к получаемой формуле не надо прибавлять капитальные затраты. Таким образом, можем сформулировать целевую функцию – полные затраты за период $L_{зд}$:

$$E_{\Sigma} = \frac{24z(\tau_{внутр} - \tau_{нар})}{1000 \left(R_0 + \frac{\delta}{\lambda_{эфф}} \right)} \sum_{i=1}^{L_{зд}} \xi_i + (S_{фас} + \delta s_{ут})(L_{зд} \sigma_{\%} + 1) + \frac{(\tau_{внутр} - \tau_5)}{1000 \left(R_0 + \frac{\delta}{\lambda_{эфф}} \right)} S_{от} \left(L_{зд} \sigma_{\%} + \frac{L_{зд}}{L_{от}} \right). \quad (3)$$

При этом если стоимость теплоты в ценах текущего года не изменяется, то формула (3) вырождается в $E_{\Sigma} = L_{зд} E$.

Для нахождения толщины оптимального утепления необходимо найти минимум функции (3) по параметру δ (толщина утепления). Возьмем для этого производную от функции и приравняем нулю:

$$-\frac{24z(\tau_{внутр} - \tau_{нар})}{1000 \left(R_0 + \frac{\delta}{\lambda_{эфф}} \right)^2} \sum_{i=1}^{L_{зд}} \xi_i + s_{ут} (L_{зд} \sigma_{\%} + 1) - \frac{\tau_{внутр} - \tau_5}{1000 \left(R_0 + \frac{\delta}{\lambda_{эфф}} \right)^2} S_{от} \left(L_{зд} \sigma_{\%} + \frac{L_{зд}}{L_{от}} \right) = 0,$$

отсюда выражаем искомый параметр δ :

$$\delta = \lambda_{эфф} \left[\sqrt{\frac{24z(\tau_{внутр} - \tau_{нар}) \sum_{i=1}^{L_{зд}} \xi_i + (\tau_{внутр} - \tau_5) S_{от} \left(L_{зд} \sigma_{\%} + \frac{L_{зд}}{L_{от}} \right)}{1000 s_{ут} (L_{зд} \sigma_{\%} + 1) \lambda_{эфф}} - R_0} \right]. \quad (4)$$

Видно, что при R_0 , достаточно больших в формуле (4), δ становится меньше нуля, т. е. дополнительное утепление в таких случаях нецелесообразно.

Результаты

Определим оптимальную толщину стены из газобетона с $\lambda_{эфф} = 0,16$ Вт/(м·К). Как и ранее, ограничимся случаем Московского региона, отопление возьмем для примера каменным углем $\xi = \xi_0 = 1,32$ руб./(кВт·ч), срок службы здания – 75 лет, $\sigma_{\%}$ возьмем равным 3,2 %. Стену будем считать однослойной без воздушных прослоек под штукатурку с двух сторон, в этом случае $R_0 = 0,16$ м²·°С/Вт. Оптимизацией системы отопления пренебрежем: $S_{от} = 0$. Стоимость возведения стен возьмем равной 5000 руб./м³. Подставляя данные, получаем, что оптимальная толщина утепления (толщина стены) при

заданных условиях составит 29 см, значение сопротивления теплопередаче при этом составляет $R = 2 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$, что в полтора раза ниже, чем нормируемое по СП 50.13330.2012.

Аналогичным образом можно оценить оптимальную толщину и другого типа стен. Например, для деревянных стен из клееного бруса стоимостью 30 000 руб./м³ и при теплопроводности древесины 0,18, сохраняя иные параметры, оптимальная толщина составит 11 см, сопротивление теплопередаче при этом – 0,77 м²·°C/Вт, что в 4 раза ниже нормируемого по СП 50.13330.2012.

Существенным образом изменяются результаты при повышении стоимости теплоты и снижении стоимости утепления. Для того чтобы убедиться в этом, найдем оптимальную толщину каркасной однослойной стены с утеплением минеральной ватой. Положим эффективный коэффициент теплопроводности равным 0,052, стоимость кубометра утепленной зоны стены равной 4670 руб., отопление электричеством по двухставочному тарифу, R_0 возьмем согласно случаю 3 в табл. 1, оптимизацию отопления снова исключим из рассмотрения, срок службы утепления возьмем сниженным по отношению к предыдущим вариантам и равным 50 лет. Подставляя данные в формулу (4), получаем оптимальную толщину утепления 19 см, сопротивление теплопередаче стены 4,2, что в полтора раза выше нормируемого.

Если при тех же параметрах предусмотрено отопление магистральным газом и стоимость теплоты ограничена стоимостью ночного тарифа электроэнергии, то оптимальная толщина утепления значительно снижается. Оптимальная толщина утепления в данном случае 12 см, сопротивление теплопередаче стены при этом 2,7 м²·°C/Вт.

Также оптимальная толщина снижается при увеличении $\sigma_{\%}$. При повышении с 3,2 до 6,4 %/год оптимальная толщина утепления в последнем расчете снижается до 9 см и сопротивление теплопередаче стены до 2,1 м²·°C/Вт.

Полученные результаты по оптимальным толщинам утепления для вариантов, описанных выше, и иных представлены в табл. 3. В табл. 3 обычным шрифтом приведены задаваемые значения, жирным – результаты расчетов, курсивом выделены варианты однослойных стен.

Таблица 3

Результаты расчетов оптимальной толщины утепления и сопротивления теплопередаче стен для различных случаев

$R_0, \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$	$S_{\text{ут}}, \text{ тыс. руб.}/\text{м}^3$	$S_{\text{от}}, \text{ тыс. руб.}/\text{кВт}$	$L_{\text{эл}}, \text{ лет}$	$L_{\text{от}}, \text{ лет}$	$\lambda_{\text{эфф}}, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	$\sigma_{\text{тепл}}, \text{ \%}/\text{год}$	$\sigma_{\%}, \text{ \%}/\text{год}$	$\xi_0, \text{ руб.}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$	$\xi_{\text{max}}, \text{ руб.}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$	$\delta, \text{ см}$	$R, \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$	$E_{\Sigma}/L_{\text{эл}}, \text{ руб.}/\text{м}^2 \cdot \text{год}$
0,16	5	0	75	–	0,16	0	3,2	1,32	–	29	2,0	140
0,16	10	0	100	–	0,16	0	5	1,32	–	21	1,5	186
0,16	30	0	75	–	0,18	0	3,2	1,32	–	11	0,77	340
0,16	9	0	75	–	0,18	0	3,2	1,32	–	22	1,4	190

Окончание табл. 3

$R_0, \text{ м}^2 \cdot \text{С} / \text{Вт}$	$S_{\text{от}}, \text{ тыс. руб.} / \text{м}^3$	$S_{\text{от}}, \text{ тыс. руб.} / \text{кВт}$	$L_{\text{зд}}, \text{ лет}$	$L_{\text{от}}, \text{ лет}$	$\lambda_{\text{эфф}}, \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$	$\sigma_{\text{тепл}}, \text{ \%} / \text{год}$	$\sigma_{\text{га}}, \text{ \%} / \text{год}$	$\xi_0, \text{ руб.} / (\text{кВт} \cdot \text{ч})$	$\xi_{\text{макс}}, \text{ руб.} / (\text{кВт} \cdot \text{ч})$	$\delta, \text{ см}$	$R, \text{ м}^2 \cdot \text{С} / \text{Вт}$	$E_{\Sigma} / L_{\text{зд}}, \text{ руб.} / \text{м}^2 \cdot \text{год}$
0,16	9	0	75	–	0,18	6,6	3,2	0,59	1,04	19	1,2	170
0,16	6	0	100	–	0,41	0	3,2	2,59	–	61	1,7	330
0,16	10	0	100	–	0,8	6,6	3,2	0,59	1,04	33	0,57	330
0,16	10	0	100	–	0,8	6,6	3,2	2,59	–	61	0,92	560
0,46	4,67	0	50	–	0,052	0	3,2	2,59	–	19	4,2	100
0,46	4,67	0	50	–	0,052	6,6	3,2	0,59	0,88	12	2,7	64
0,46	4,67	0	50	–	0,052	6,6	6,4	0,59	0,88	9	2,1	79
0,46	4,67	20	50	30	0,052	6,6	3,2	0,59	0,88	16	3,5	82
0,26	6	0	50	–	0,055	0	3,2	3,14	–	26	5,1	130
1,27	5	0	50	–	0,052	0	3,2	1,04	–	9	3,0	58
0,16	4	0	5	–	0,055	0	3,2	2,59	–	12	2,4	230

Данные в таблице касаются только случая стадии строительства здания. Для вынесения решений о целесообразности утепления имеющегося здания следует проводить так называемый «повариантный расчет». В случае утепления имеющегося дома большое значение имеет параметр $S_{\text{фас}}$ (стоимость мероприятий по подготовке стен и изготовлению фасадов). Если обустройство нового фасада в исходном варианте не требуется, то после наружного утепления обычно необходимо изготавливать новую отделку, стоимость которой может достигать нескольких тысяч рублей за квадратный метр. Таким образом, возникают два предельных важных случая. В первом – изготовление фасада запланировано в любом случае, и стоит вопрос о том, какую толщину утепления заложить за этот фасад. Во втором – рассматривается вопрос, утеплять дом и изготавливать фасад или оставить как есть, не проводя никаких мероприятий.

Рассмотрим целесообразность утепления дома в два кирпича с изготовлением фасада из винилового сайдинга. Стоимость возведения фасада с учетом материалов и трудозатрат (фасад с необходимыми комплектующими) находится на уровне от 400 до 1500 руб. за м^2 . Возьмем 500 руб./ м^2 , ограничимся случаем, в котором наиболее целесообразно утепление – отопление дорогим энергоносителем, дизельным топливом ($\xi = 3,14 \text{ руб.} / (\text{кВт} \cdot \text{ч})$), расходование собственных средств – $\sigma_{\text{га}} = 3,2 \text{ \%} / \text{год}$. Так как дом уже имеется, будем считать, что система отопления остается прежняя – $S_{\text{от}} = 0$. Чтобы сделать утепление еще более выгодным, возьмем относительно небольшую стоимость утепления – 2500 руб./ м^3 достаточно эффективным утеплителем с $\lambda_{\text{эфф}} = 0,04 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$.

Посчитаем в данном случае оптимальную толщину утепления и сравним среднегодовые затраты на квадратный метр стены в исходном варианте и в варианте с утеплением. Срок службы утепления и фасада возьмем равным

50 лет. Оптимальная толщина утепления по формуле (4) в данном случае составляет 29 см, сопротивление теплопередаче стены при этом – $8,1 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$, среднегодовые траты на квадратный метр стены – 106 руб. Посчитаем среднегодовые траты при этом в исходной точке (принимая равным нулю второе и третье слагаемое в формуле (3)):

$$E_0 = \frac{24z(\tau_{\text{внутр}} - \tau_{\text{нар}}) \sum_{i=1}^{L_{\text{зд}}} \xi_i}{1000R_0 L_{\text{зд}}}. \quad (5)$$

Значение E_0 в данном случае составляет $385 \text{ руб./м}^2/\text{год}$.

Разберемся, в каких случаях утепление рассматриваемого кирпичного дома теряет смысл, для этого по очереди изменяем параметры в расчете до получения совпадения средних годовых затрат в утепленном и неутепленном варианте:

– увеличение $S_{\text{фас}}$. При достижении величины 5900 руб./м^2 утепленный вариант становится менее экономичен, чем исходный;

– увеличение $s_{\text{ут}}$. Предельное значение, при котором еще целесообразно утепление, – 110 тыс. руб./м³. Данная величина значительно превосходит фактическую стоимость утепления, т. е., можно сказать, не оказывает существенного влияния;

– снижение стоимости теплоты ξ . При значении $0,42 \text{ руб./м}^3$, не повышающем в ценах текущего года, утепление становится нецелесообразным;

– увеличение $\sigma_{\%}$. При значении 37 %/год утепление становится нецелесообразным;

– снижение $L_{\text{зд}}$. При снижении данной величины менее 3 лет утепление также становится нецелесообразным.

Таким образом, при отоплении магистральным газом целесообразность утепления дома со стенами в два кирпича является неоднозначной. Значения $S_{\text{фас}}$ на практике могут достигать значений на уровне 2–4 тыс. руб./м², что делает мероприятие нерентабельным, также можно говорить о преждевременности утепления кирпичного дома при отоплении газом, т. к. текущее значение стоимости данного энергоносителя ниже предельного, полученного в расчете, при котором утепление еще целесообразно.

По результатам проведенных исследований получено, что наиболее рентабельная толщина утепления стен с точки зрения уменьшения денежных затрат за срок эксплуатации существенным образом зависит от ряда факторов. Оптимальное сопротивление теплопередаче стен при этом может в несколько раз меняться от нормируемого в обе стороны. Получен ряд результатов расчетов, имеющих самостоятельное значение при проектировании, и есть возможность с использованием развитого в данной статье подхода без сложного математического моделирования провести расчеты для каждого конкретного случая.

Примечание редактора: Статья имеет дискуссионный характер и опубликована для обсуждения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Табунчиков Ю.А., Ливчак В.И., Гагарин В.Г.* Пути повышения энергоэффективности эксплуатируемых зданий // АВОК. 2009. № 5. С. 38–47.
2. *Петрова З.К.* Значение развития малоэтажной жизнеобеспечивающей жилой застройки для будущего России // Academia. Архитектура и строительство. 2014. № 2. С. 69–76.
3. *Роддатис К.Ф., Полтарецкий А.Н.* Справочник по котельным установкам малой производительности. М.: Энергоатомиздат. 1989. 488 с.
4. *Гагарин В.Г.* Методы экономического анализа повышения уровня теплозащиты ограждающих конструкций зданий. Ч. 1 // АВОК. 2009. № 1. С. 10–16.

REFERENCES

1. *Tabunshchikov Yu.A., Livchak V.I., Gagarin V.G.* Puti povysheniya ehnergoehffektivnosti ehkspluatiruemykh zdaniy [Energy efficiency improvement of buildings]. AVOK. 2009. No. 5. (rus)
2. *Petrova Z.K.* Znachenie razvitiya maloetazhnoy zhizneobespechivayushchej zhiloy zastrojki dlya budushchego Rossii [The low-rise life-supporting residential development for the future of Russia]. Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo. 2014. No. 2. Pp. 69–76. (rus)
3. *Roddatis K.F., Poltaretskii A.N.* Spravochnik po kotel'nykh ustanovkam maloj proizvoditel'nosti [Handbook of low efficiency boiler installations]. Moscow: Energoatomizdat. 1989. (rus)
4. *Gagarin V.G.* Metody ehkonomicheskogo analiza povysheniya urovnya teplozashchity ograzhdayushchih konstrukcij zdaniya. Chast' 1 [Methods of economic analysis of increasing the thermal protection of enclosure structures. Pt 1]. AVOK. 2009. No. 1. (rus)

Сведения об авторе

Окунев Александр Юрьевич, канд. физ.-мат. наук, гл. научный сотрудник, Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН, 127238, г. Москва, Локомотивный проезд, 21, okunevay@gmail.com

Author Details

Aleksandr Yu. Okunev, PhD, Senior Scientist, Research Institute of Building Physics RAACS, 21, Lokomotivnyi Ave., 127238, Moscow, Russia, okunevay@gmail.com