

Методы экономического анализа повышения уровня теплозащиты ограждающих конструкций зданий

Часть 1

В. Г. Гагарин, доктор техн. наук, профессор



Постоянный рост цен на тепловую и электрическую энергию, наблюдаемый в последние годы, делает особенно актуальной проблему теплозащиты ограждающих конструкций зданий с целью экономии энергетических ресурсов. Однако, доводы за повышение уровня теплозащиты зданий носят зачастую декларативный характер и крайне неубедительны, как и случайные данные из зарубежных источников, приводящиеся без анализа правомерности их сопоставления с аналогичными российскими данными. Эти «аргументы» перепечатаются из публикации в публикацию. Первоисточник некоторых из них уже невозможно и установить. Так, например, информация, что в нашей стране на отопление зданий приходится до 40 % потребляемых энергоресурсов не находит подтверждения – в статистических ежегодниках эти данные отсутствуют.

Экономические расчеты, подтверждающие целесообразность повышения требований к теплозащите ограждающих конструкций методом минимума приведенных затрат [1 (приложение Д)], содержат явные методические ошибки, которые не были замечены в течение многих лет.

Наиболее распространенным аргументом в пользу повышения теплозащитных свойств ограждающих конструкций служит зарубежный опыт строительства зданий с применением эффективных теплоизоляционных материалов. Однако, для его использования необходимо было бы провести анализ, в ходе которого установить:

- признаки сходства строительства и эксплуатации зданий в нашей стране и за рубежом;
- существенность сходных признаков;
- признаки различия строительства и эксплуатации зданий в нашей стране и за рубежом;
- несущественность признаков различия;
- эффективность изучаемого опыта.

Никакого анализа такого рода в отечественной научно-тех-

нической литературе не встречалось. И это несмотря на то, что в стране продолжает действовать множество научно-исследовательских организаций экономического направления.

Одним из существенных признаков является подобие (сходство) условий окупаемости мероприятий по повышению теплозащиты зданий в нашей стране и за рубежом. Если такого подобия нет, то нельзя бездумно перенимать для России опыт зарубежных стран.

На основании изложенных автором в [2, 3] подходов в настоящей публикации рассматриваются вопросы экономической целесообразности утепления ограждающих конструкций до уровня, превосходящего санитарно-гигиенические требования. При этом часть данных, приведенных для иллюстрации тех или иных положений, относится к периоду написания [2].

Метод минимума приведенных затрат

При рассмотрении экономических аспектов повышения теплозащитных свойств ограждающих конструкций с целью энергосбережения традиционно исходили из следующей модели. Инвестор осуществляет единовременные вложения K на строи-

тельство 1 м^2 ограждающей конструкции. Годовые затраты на компенсацию теплотерь через 1 м^2 этой конструкции зависят от ее сопротивления теплопередаче и составляют величину \mathcal{E} . Суммарные затраты на строительство и эксплуатацию конструкции в течение T лет (приведенные затраты) составляют:

$$П = K + T \cdot \mathcal{E}. \quad (1)$$

Задача заключается в минимизации величины $П$. На минимизации приведенных затрат основаны методы расчета «экономически целесообразного», «оптимального» и т. д. сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций, например, подробно рассмотренные Л. Д. Богуславским в [4] и еще, по крайней мере, в шести его книгах. В этих методах величины K и \mathcal{E} выражаются в виде функций от сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции, которое принимается в качестве независимой переменной¹. Затем находится производная $П$ по указанной переменной и значение сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции, при котором эта производная равна нулю. Это значение сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции считается «экономически целесообразным» (рис. 1а).

Эти методы в настоящее время нельзя признать удовлетворительными. Прежде всего, следует отметить, что они совершенно не рассчитаны на то, что ограждающая конструкция может качественно изменяться при изменении ее сопротивления теплопередаче в широком диапазоне. Следовательно, при непрерывном изменении R_0 между значениями 1 и $5 \text{ м}^2\text{С/Вт}$ функция K будет иметь разрывы, обусловленные изменением конструкции стены (при изменении проекта, при изменении парка форм, при изменении связей и других деталей конструкции и т. д.) (рис. 1б). При этом функция K , а следовательно и $П$, на рассматриваемом отрезке изменения R_0 не будут являться дифференцируемыми, следовательно, нельзя искать минимум функции $П$ путем ее дифференцирования. Этот факт отмечен практически в любом учебнике математики для первого семестра технического вуза, например [5]. Иными словами, «минимум», найденный таким образом, является локальным и не является действительным минимумом функции на рассматриваемом отрезке (рис. 1б). Другой недостаток рассматриваемых методов заключается в волюнтаристском выборе параметра T , который принимается на основании каких-либо посторонних соображений, раньше это был «нормативный срок окупаемости», равный 8, а затем 12 годам. В формуле вида (1) вместо T используется «коэффициент учета эксплуатационных затрат с приведением (дисконтированием) затрат будущих лет к начальному периоду времени», этот коэффициент вычисляется с использованием двух параметров:

¹ В некоторых вариантах рассматриваемого метода в качестве переменной принимается толщина слоя теплоизоляции или величина, пропорциональная этой толщине.



КЛИМАТИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

- Кондиционеры
- Чиллеры и фанкойлы
- Увлажнители воздуха
- осушители воздуха
- Системы автоматики
- Вентиляционное оборудование

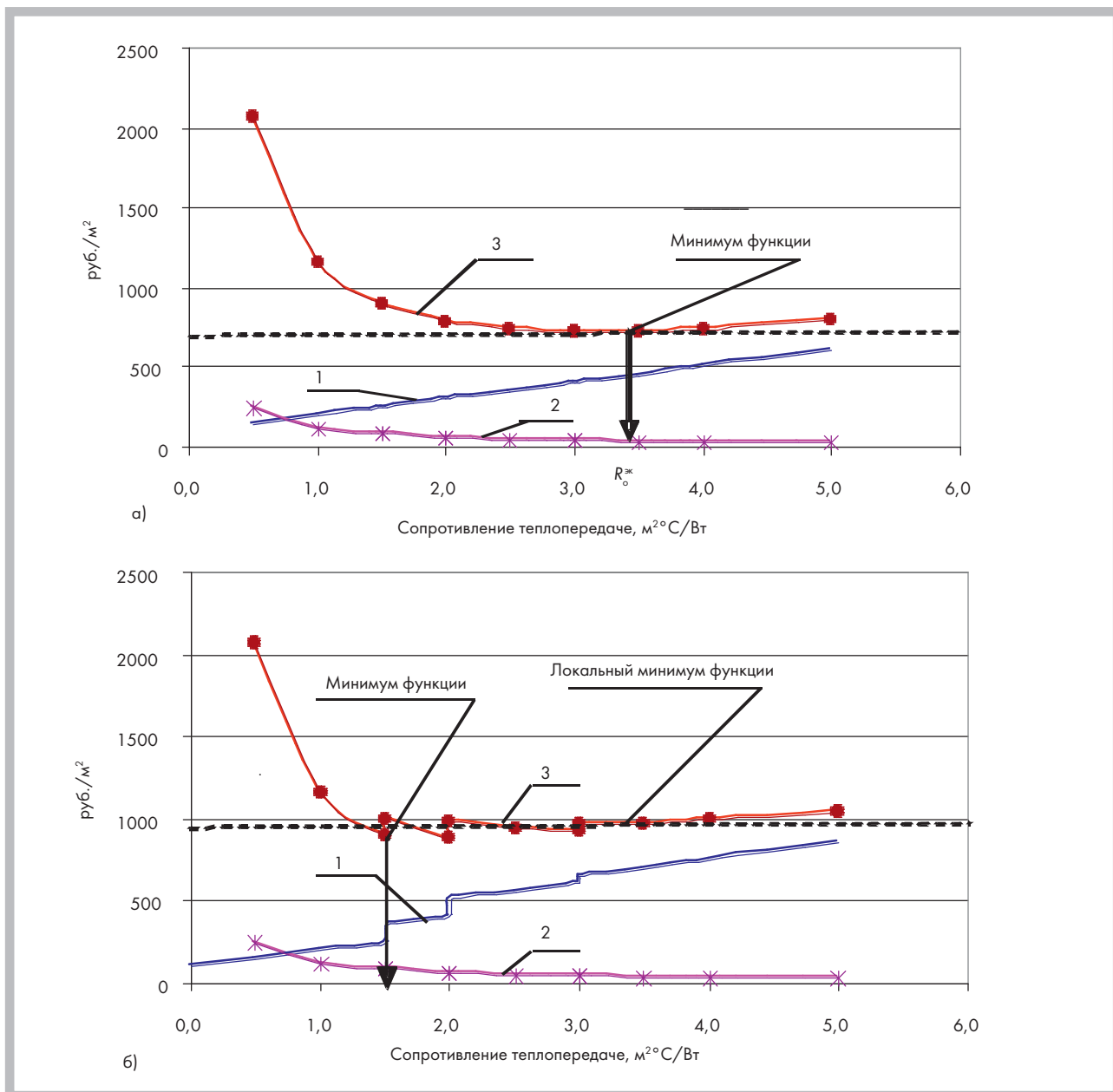


ОАЗИС ХОРОШЕГО КЛИМАТА



СИСТЕМЫ ВЕНТИЛЯЦИИ, ОТОПЛЕНИЯ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА

Москва, улица Тимирязевская, 1, строение 4.
Тел.: (495) 228 7777. Факс (495) 228 7701. E-mail: arktika@arktika.ru
Санкт-Петербург, улица Разъезжая, 12, офис 43.
Тел.: (812) 441 35 30. E-mail: arktika@arktika.quantum.ru



■ Рис. 1. Схема определения экономически целесообразного сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции:
 1 – единовременные затраты; 2 – годовые затраты на отопление; 3 – приведенные затраты за срок окупаемости
 а) Идеализированное рассмотрение (неверное)
 б) Неидеализированное рассмотрение (реальное)

«норматива приведения» E и «расчетного периода учета эксплуатационных затрат» n [1, приложение Д]. Значение E принято равным 0,1 без всякого обоснования, а значение n принято равным 30 годам «согласно постановлению Правительства Москвы (№ 1036)». При таких значениях параметров коэффициент дисконтирования получился равным 9,5. Таким образом, этот коэффициент взят также волюнтаристски, а сам расчет проведен как бы со сроком окупаемости, равным 9,5 годам. Кроме того, цена тепловой энергии в этих расчетах существенно завышена против действующей. Результаты таких расчетов нельзя признать научно обоснованными (в крайнем слу-

чае, их можно ограниченно использовать только при сопоставлении некоторых вариантов конструкций), поскольку они опираются на ошибочную математическую модель, а данные для расчетов обоснованы «постановлением Правительства Москвы (№ 1036)» и другими волюнтаристскими решениями.

Математическая модель условий окупаемости затрат на повышение теплозащиты ограждающих конструкций зданий

Сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций не может быть принято меньше значения, определенного из

санитарно-гигиенических требований. Поэтому если имеется некоторый базовый (нулевой) вариант с минимальным допустимым сопротивлением теплопередаче R_0^0 , например с сопротивлением теплопередаче, не превышающим санитарно-гигиенические требования, то минимизируется разность приведенных затрат ΔP других вариантов относительно базового варианта:

$$\Delta P = (K_1 - K_0) - T(\Theta_0 - \Theta_1) = \Delta K - T \Delta \Theta. \quad (2)$$

При этом ΔK представляет собой единовременные затраты на дополнительное утепление конструкции, а $\Delta \Theta$ – экономии средств на отопление, обусловленную дополнительным утеплением. Если ограждающая конструкция обладает достаточной долговечностью, то дополнительные единовременные затраты окупаются при значении T_0 , определяемом из условия $\Delta P = 0$ формулой:

$$T_0 = \Delta K / \Delta \Theta. \quad (3)$$

Величина T_0 представляет собой период окупаемости. В рамках рассмотренной модели, при отсутствии платы за кредит банка, единовременные затраты на дополнительное утепление обязательно окупятся, хотя, возможно, и в течение довольно длительного срока (рис. 2).

Иная ситуация получается, если учитывать платежи за кредит банка (процентную ставку) по затратам на дополнительное утепление ограждающей конструкции. В этом случае можно приводить затраты будущих лет к начальному периоду времени (метод дисконтирования) или приводить единовременные затраты и эксплуатационные расходы к некоторому моменту времени в будущем (метод компаундинга) [6]. Оба метода дают одинаковый результат. Опыт показывает, что применение соответствующих формул, хорошо известных в экономике, является непонятным для инженеров, вследствие чего остаются непонятными и последующие выводы. Поэтому в данной статье вывод всех уравнений выполнен «с нуля», при этом результат получен тот же, что и при использовании указанных формул.

При дальнейшем рассмотрении предполагается:

1. Процентная ставка при заимствовании равна процентной ставке при инвестировании.
2. Лимит при получении кредита отсутствует.
3. Процентная ставка одинакова на всех субпериодах рассматриваемого периода в T лет.

Совокупность таких условий в теории инвестиционных расчетов называется «Совершенный неограниченный рынок капитала при пологой кривой процента» [7]. Можно усложнять эти условия с целью приближения их к реальности, например, учитывать изменение процентной ставки, но это усложнит схему рассуждений и вряд ли добавит точности. Кроме этих предположений в качестве денежной единицы принимается доллар США. Это сделано только для



КЛИМАТИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

- Кондиционеры
- Чиллеры и фанкойлы
- Увлажнители воздуха
- Сушители воздуха
- Системы автоматики
- Вентиляционное оборудование

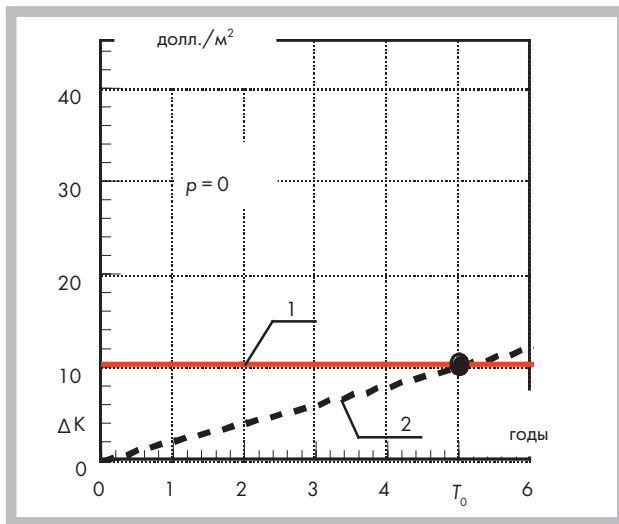


ОАЗИС ХОРОШЕГО КЛИМАТА



СИСТЕМЫ ВЕНТИЛЯЦИИ, ОТОПЛЕНИЯ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА

Москва, улица Тимирязевская, 1, строение 4.
Тел.: (495) 228 7777. Факс (495) 228 7701. E-mail: arktika@arktika.ru
Санкт-Петербург, улица Разъезжая, 12, офис 43.
Тел.: (812) 441 35 30. E-mail: arktika@arktika.quantum.ru



■ Рис. 2. При отсутствии процентной ставки за банковский кредит единовременные затраты на дополнительное утепление ограждающей конструкции обязательно окупятся за счет прибыли, получаемой от экономии энергии на отопление, хотя срок окупаемости, T_0 , может оказаться довольно большим:
 1 – изменение во времени долга за кредит банка на единовременные затраты;
 2 – прибыль, получаемая от экономии энергии на отопление при эксплуатации ограждающей конструкции

возможности проведения международных сопоставлений. При необходимости можно заменить доллар национальной валютой.

Как принято в западных странах, домовладелец для дополнительного утепления 1 м^2 ограждающей конструкции своего дома берет кредит в банке в сумме ΔK , долл./ м^2 , с фиксированной годовой процентной ставкой за кредит p , % в год. Для упрощения выкладок будем использовать величину p в долях единицы. Каждый год долг домовладельца увеличивается в $(1 + p)$ раз. Через T лет долг домовладельца банку составит:

$$\Delta K (1 + p)^T. \quad (4)$$

Однако за счет дополнительного утепления ограждающей конструкции снизятся теплопотери через нее, и, следовательно, домовладелец будет получать ежегодную прибыль за счет снижения стоимости отопления. На 1 м^2 ограждения в год это составит $\Delta \mathcal{E}$ долл./($\text{м}^2 \cdot \text{год}$). Полученную прибыль домовладелец возвращает банку в начале следующего года, то есть уменьшает кредит на величину $\Delta \mathcal{E}$. Это равносильно тому, что домовладелец делает «накопительный вклад» в банк в сумме $\Delta \mathcal{E}$ с той же фиксированной годовой процентной ставкой p % в год. Такую операцию домовладелец проводит ежегодно. Если утепление здания было выполнено в тот же год, когда был взят кредит в банке, то через год домовладелец уже начнет делать свои вклады. Его первый вклад будет увеличиваться ежегодно в $(1 + p)$ раз и через T лет после взятия кредита будет равен $\Delta \mathcal{E} (1 + p)^{T-1}$. Вклад,

сделанный на второй год в это же время, станет равным $\Delta \mathcal{E} (1 + p)^{T-2}$. Через T лет весь «накопительный вклад» будет равен:

$$\begin{aligned} \Delta \mathcal{E} (1 + p)^{T-1} + \Delta \mathcal{E} (1 + p)^{T-2} + \dots + \Delta \mathcal{E} &= (\Delta \mathcal{E} (1 + p)^T - \Delta \mathcal{E}) / p = \\ &= \Delta \mathcal{E} ((1 + p)^T - 1) / p. \end{aligned} \quad (5)$$

При суммировании в (5) применена формула суммы геометрической прогрессии. С учетом (4) и (5) разность $\Delta \Pi$ составит:

$$\Delta \Pi = \Delta K (1 + p)^T - \Delta \mathcal{E} ((1 + p)^T - 1) / p. \quad (6)$$

Дополнительные единовременные затраты ΔK окупятся при значении, T_0 , определяемом из условия $\Delta \Pi = 0$, то есть:

$$\Delta K (1 + p)^{T_0} = \Delta \mathcal{E} ((1 + p)^{T_0} - 1) / p. \quad (7)$$

Решение этого уравнения относительно T_0 дает:

$$T_0 = \ln[1 / (1 - (\Delta K / \Delta \mathcal{E}) p)] / \ln(1 + p). \quad (8)$$

При $p \rightarrow 0$ уравнение (8) переходит в (3). При p , отличном от 0, решение (8) существует только в том случае, если выражение под логарифмом положительно:

$$1 - (\Delta K / \Delta \mathcal{E}) p > 0. \quad (9)$$

Следовательно, единовременные затраты окупаются при условии:

$$\Delta K / \Delta \mathcal{E} < 1/p. \quad (10)$$

Выполнение этого неравенства является условием окупаемости любого мероприятия при ненулевой учетной ставке банка, то есть при существовании платы за кредит.

Рыночная экономика западноевропейского образца как раз и характеризуется существенной платой за кредиты банков. Величина p иногда называется ростовщический процент. В русском языке такая плата, по сути являющаяся учетной ставкой за кредит банка, называлась *лихва*, откуда выражение окупиться с *лихвой*, а ростовщик (банкир) назывался *лихоимщик*.

Из (10) следует, что чем больше величина p , тем больше должна быть ежегодная прибыль $\Delta \mathcal{E}$ от вложения средств ΔK , чтобы эти вложения окупались. При больших значениях p никакие долгосрочные инвестиции экономически невыгодны и могут осуществляться только на внеэкономической основе, то есть за счет бюджетных средств государства.

Вернемся к рассматриваемой теплофизической задаче. Теплопотери через 1 м^2 конструкции за отопительный период равны:

$$q = 0,024 \frac{(t_{\text{в}} - t_{\text{от.п.}}) z_{\text{от.п.}}}{R_0} = 0,024 \frac{GCOП}{R_0} = 0,024 \cdot GCOП \cdot k, \quad (11)$$

где R_0 – сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции, $\text{м}^2 \cdot \text{C} / \text{Вт}$;

Видеть больше. Знать больше.

С тепловизором testo 880



Передовая измерительная технология в новом ценовом измерении

www.testo.ru/880

Российское отделение testo AG -
 ООО "Тэсто Рус"
 Тел.: (495) 788-98-11;
 Факс: (495) 788-98-49;
info@testo.ru; www.testo.ru

k – коэффициент теплопередачи ограждающей конструкции, Вт/(м²·°C);

$ГСОП$ – градусо-сутки отопительного периода, °C сут./год, определяемые по формуле: $ГСОП = (t_{в} - t_{от.п.})z_{от.п.}$, $t_{в}$ – температура внутреннего воздуха помещения, °C; $t_{от.п.}$ – средняя температура отопительного периода, °C; $z_{от.п.}$ – продолжительность отопительного периода, сут/год;

0,024 = 24 / 1 000 – переводной коэффициент, кВт·ч / (Вт · сутки).

С учетом (11) годовая прибыль домовладельца за счет снижения теплопотерь через 1 м² ограждения определяется по формуле:

$$\Delta \mathcal{E} = (1/R_0^0 - 1/R_0^1) ГСОП \cdot 0,024 \cdot C_T = -(k_1 - k_0) ГСОП \cdot 0,024 \cdot C_T = -\Delta k \cdot ГСОП \cdot 0,024 C_T, \quad (12)$$

где $\Delta \mathcal{E}$ – годовая прибыль домовладельца за счет снижения теплопотерь через 1 м² ограждения при дополнительном утеплении, долл./(м²·год);

R_0^0, R_0^1 – сопротивления теплопередаче базового и рассматриваемого варианта ограждения, соответственно, м²·°C/Вт;

k_0, k_1 – коэффициенты теплопередачи базового и рассматриваемого варианта ограждения, соответственно, Вт/(м²·°C);

C_T – стоимость тепловой энергии, долл./(кВт·ч).

С учетом (12) неравенство (10) принимает вид:

$$-\frac{\Delta k}{\Delta k} < 0,024 \cdot ГСОП \cdot \frac{C_T}{p} = \omega. \quad (13)$$

Левая часть этого неравенства, $(-\Delta k/\Delta k)$, представляет собой *удельные единовременные затраты* на снижение коэффициента теплопередачи ограждающей конструкции на 1 Вт/(м²·°C) и определяется свойствами конструкции: стоимостью ее изготовления, стоимостью материалов, начальным значением k_0 и т. д. Правая часть, ω , напротив, никак не зависит от конструкции, а полностью определяется климатическими, географическими и экономическими характеристиками страны или региона. И эта правая часть представляет собой *предельное значение для удельных единовременных затрат*, при которых они окупаются.

Если неравенство (13) не выполняется, то затраты на повышение сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции никогда не окупятся (рис. 3), если выполняется – то окупятся (рис. 4).

Интересно рассмотреть другие варианты записи неравенства (13).

$$\Delta k \cdot p < 0,024 ГСОП (-\Delta k) C_T. \quad (13a)$$

Левая часть неравенства (13a) представляет собой денежную сумму, которую необходимо ежегодно платить банку за кре-

дит. Правая часть представляет собой денежную сумму, которая ежегодно образуется за счет экономии тепловой энергии вследствие снижения теплопотерь через ограждающую конструкцию с дополнительным утеплением. Следовательно, смысл неравенства (13а) заключается в том, что ежегодная экономия денежных средств должна превышать ежегодную плату за кредит банка. Только в этом случае возможна окупаемость средств на повышение теплозащиты ограждающей конструкции.

Еще одна форма записи неравенства (13):

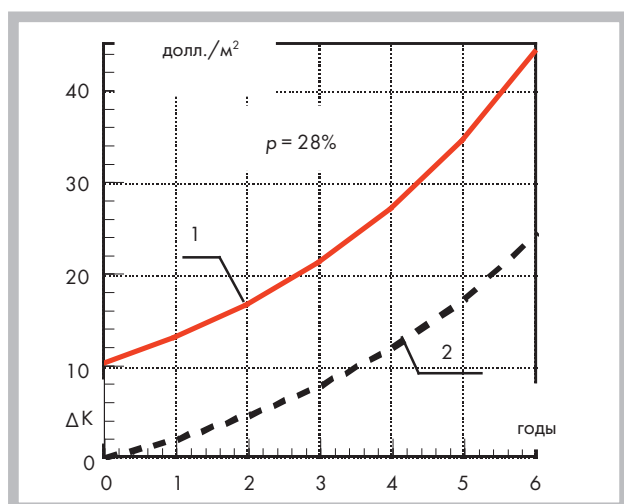
$$p\Delta K/C_t < 0,024 \text{ ГСОП}(-\Delta k). \quad (13б)$$

Здесь $\Delta K/C_t$ – стоимость в энергетических единицах ($\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$) одновременных затрат на утепление одного м^2 ограждающей конструкции. Левая часть неравенства (13б) $p\Delta K/C_t$ представляет собой ежегодную плату банку за кредит в энергетических единицах ($\text{кВт}\cdot\text{ч}/(\text{м}^2\cdot\text{год})$). Правая часть неравенства $0,024 \cdot \text{ГСОП}(-\Delta k)$ представляет собой ежегодную экономию тепловой энергии за счет снижения теплопотерь через 1 м^2 ограждающей конструкции, $\text{кВт}\cdot\text{ч}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$. Смысл неравенства (13б) заключается в том, что ежегодная экономия энергии должна превышать ежегодные процентные отчисления банку за кредит на одновременные затраты, выраженные в энергетических единицах. То есть если вместо денег все оценивать в единицах энергии, то в качестве условия окупаемости вложений следует использовать неравенство (13б).

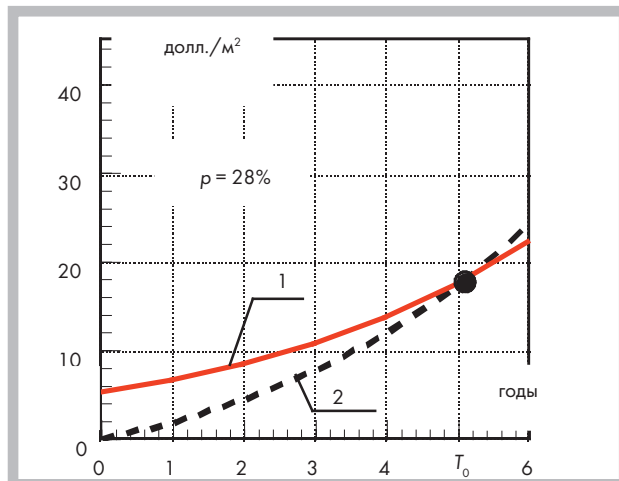
Неравенства (13), (13а) и (13б) можно представить в безразмерном виде, получающемся из (13) (при этом следует помнить, что p измеряется в долях ед./год):

$$\Delta K \cdot p / (C_t(-\Delta k)\text{ГСОП} \cdot 0,024) < 1. \quad (13в)$$

Левая часть (13в) является безразмерным критериальным



■ Рис. 3. При наличии процентной ставки за банковский кредит и достаточно больших одновременных затратах на дополнительное утепление ограждающей конструкции эти затраты никогда не окупятся за счет прибыли, получаемой от экономии энергии на отопление, неравенство (13) не выполняется



■ Рис. 4. При той же процентной ставке за банковский кредит, но меньших одновременных затратах на дополнительное утепление ограждающей конструкции эти затраты могут окупиться за счет прибыли, получаемой от экономии энергии на отопление, неравенство (13) выполняется

числом, его можно использовать для оценки окупаемости инвестиций в утепление зданий.

Неравенства (13а) – (13в) эквивалентны (13). Любое из этих неравенств является критерием окупаемости затрат на повышение теплозащиты ограждающей конструкции. Однако неравенство (13) представляется более удобным для использования при решении практических задач. Его можно использовать непосредственно для анализа конкретных вариантов утепления ограждающей конструкции, а также при сопоставлении условий и периода окупаемости повышения теплозащиты зданий в различных странах. Во второй части статьи будет рассмотрено применение изложенной теории для решения ряда задач экономического анализа повышения теплозащиты зданий.

Литература

1. Пособие к МГСН 2.01-99 «Энергосбережение в зданиях» / Вып. 1. Проектирование теплозащиты жилых и общественных зданий. – М.: Москомархитектура, 2000.
2. Гагарин В. Г. Об окупаемости затрат на повышение теплозащиты ограждающих конструкций зданий // Новости теплоснабжения. – 2002. № 1.
3. Гагарин В. Г. Экономические аспекты повышения теплозащиты ограждающих конструкций зданий в условиях рыночной экономики // Светопрозрачные конструкции. – 2002. – № 3; № 4.
4. Богуславский Л. Д. Снижение расхода энергии при работе систем отопления и вентиляции. – М.: Стройиздат, 1985.
5. Фихтенгольц Г. М. Основы математического анализа. – СПб., 1999.
6. Овсянникова Т. Ю. Экономика строительного комплекса. Экономическое обоснование и реализация инвестиционных проектов. – Томск, изд. ТГАСУ, 2004.
7. Крушвиц Л. Инвестиционные расчеты. – СПб., 2001. ■