

УДК 699.86

КОЗЛОВ В.В.

ОСНОВЫ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕПЛОЗАЩИТЫ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ПО ОКУПАЕМОСТИ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ МЕРОПРИЯТИЙ.

Введение.

Выбор уровня тепловой защиты ограждающих конструкций должен быть чем-то обоснован. Исторически нормирование шло по пути нынешних санитарно-гигиенических требований. При этом, обоснованием выбранного уровня тепловой защиты служило удобство для проживания людей. После перехода с 1995 года к нормированию по принципу энергосбережения возникла необходимость в новом обосновании нормативных требований. Очевидно, что таким обоснованием должен был служить экономический расчет эффективности энергосберегающих мероприятий. К сожалению, квалифицированных расчетов по полноценному экономическому обоснованию требуемых величин тогда проведено не было.

Прошедшее время показывает, что подтверждение экономической целесообразности требуемых величин было бы невозможным. Многообразие экономических ситуаций, слабая предсказуемость их изменения во времени, делает общие экономические рассуждения и расчеты практически бесполезными. Тем не менее, большинство работ по экономике тепловой защиты зданий последних 40 лет были именно общими и крайне далекими от практики¹. Они изобиловали

¹ Здесь следует заметить, что грамотные экономические работы по выбору уровня тепловой защиты существуют, например, есть замечательная работа Сокольского В.А. [1] написанная сто лет назад, но по уровню исполнения не потерявшая актуальности до сих пор. Есть современная работа Гагарина В.Г. [2]

множеством ошибок и неточностей, что приводило к парадоксальным, зачастую противоречащим друг другу результатам.

Настоящая статья посвящена исследованию экономики тепловой защиты и подготовке метода оптимизации ограждающих конструкций. Отличительной чертой работы является рассмотрение конструкции как сложной системы множества элементов и практическая направленность развиваемых методов.

Некоторые ошибки экономических исследований.

Кратко рассмотрим основные недостатки современных работ по экономическому анализу тепловой защиты зданий.

Обычно, для выбора оптимального уровня тепловой защиты исходят из следующей модели. Инвестор осуществляет единовременные вложения K на производство 1 м^2 ограждающей конструкции. Годовые затраты на компенсацию потерь теплоты 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 $Z_{ок}$ лет (приведенные затраты) составляют:

$$P=K+ Z_{ок} \cdot \mathcal{E}$$

(1)

Задача заключается в минимизации функции приведенных затрат.

Такой подход является основой экономической оптимизации, при этом различия между работами разных авторов заключаются в записи затрат на строительство и эксплуатацию конструкции и способах осуществления минимизации. В рассмотрение могут быть включены (или не включены) различные части конструкции, особенности отопи-

тельной системы, экономическая ситуация, например учет инфляции или дисконтирования затрат.

На минимизации приведенных затрат основаны методы расчета «экономически целесообразного», «оптимального» и т.п. сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций, например, подробно рассмотренные Л.Д. Богуславским в [3] и еще, по крайней мере, в шести его книгах, или Г.П. Васильевым в [4]. В этих методах величины K и ε выражаются в виде функций от сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции, которое принимается в качестве независимой переменной². Затем находится производная функции Π по указанной переменной и значение сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции, при котором эта производная равна нулю. Полученное значение сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции считается «экономически целесообразным».

Как уже было сказано, большинство работ последних десятилетий содержат одни и те же повторяющиеся ошибки, значительно снижающие ценность получаемых результатов. Иногда эти ошибки даже специально используются для подгонки результатов под заданную идею.

Чаще всего встречаются следующие ошибки:

1. Нет рассмотрения конкретной конструкции. Для авторов конструкция – некая абстракция, поэтому, получая абсурдные результаты, они этого даже не замечают.
2. Фактически рассматриваются конструкции без неоднородностей. Даже если вводится поправочный коэффициент на теп-

² В некоторых вариантах рассматриваемого метода в качестве переменной принимается толщина слоя теплоизоляции или величина пропорциональная этой толщине.

лотехническую неоднородность, он не изменяется с изменением характеристик конструкции, что неверно.

3. Оптимизация конструкции проводится в предположении непрерывного и гладкого изменения всех величин. В частности, исходя из этого предположения, ищется минимум приведенных затрат. Но характеристики конструкций изменяются скачками. Это их неотъемлемое свойство. Поэтому находить минимум функции приведенных затрат дифференцированием нельзя и результаты таких поисков ничтожны, без дополнительного математического исследования.
4. Часто в рассмотрение принимается множество отдаленных и мало связанных с решаемой задачей обстоятельств. К таким деталям можно отнести: прогнозы изменения цен на энергоносители на десятилетия вперед; прогноз проблем с сетями или генерирующими мощностями; изучение инфляции и ссудного процента; собирание множества различных конструкций в единый комплекс. Размывание непосредственно решаемой задачи и снижение точности с включением каждого нового элемента приводит к погрешностям большим по абсолютной величине, чем сам результат. Особенно это характерно для работы [4].

Приступая к оптимизации ограждающей конструкции, логично именно ограждающую конструкцию и рассматривать подробно, разрешая возникающие при этом проблемы. Остальные факторы могут быть рассмотрены более схематично. В противном случае, никакой оптимизации получить невозможно. Говоря коротко, абстрактная конструкция будет абстрактно оптимизирована с абстрактным результатом.

Выбор функции приведенных затрат.

Зададимся целью провести экономическое исследование тепловой защиты ограждающей конструкции, учитывая перечисленные выше ошибки. При этом, будем стараться создать простой инструмент для анализа реальных конструкций в процессе проектирования.

Создание доступного, по сути, инженерного метода почти всегда предполагает введение удобного критерия, основные параметры которого могут заранее посчитать узкие специалисты, а на долю проектировщика оставить только его использование. Для этого требуется добиться в процессе исследования разделения факторов зависящих от выбора конструкции и факторов зависящих от района строительства и экономической ситуации.

Как всегда, сначала нужно записать функцию приведенных затрат. Для достижения поставленных целей, функция приведенных затрат должна учитывать сложный состав ограждающих конструкций и дискретность переменных.

Вопросы дисконтирования затрат и инфляции далее рассматриваться не будут. Правильный учет дисконтирования затрат и инфляции по настоящему сложная научная работа, которая в большинстве известных нам случаев проводится недостаточно аккуратно даже научными сотрудниками и тем более не нужна для инженерного метода. Кроме того, дисконтирование затрат и инфляция противоположно направленные процессы, которые будут по большей части скомпенсированы. Небольшая не скомпенсированная неувязка между этими процессами может быть свободно учтена путем правильного выбора срока окупаемости в бездисконтируемой модели, однако сам во-

прос правильного выбора срока окупаемости столь сложен, что на его фоне учет неувязки окажется весьма мелкой проблемой.

Функция приведенных затрат на 1 м² ограждающей конструкции запишется в следующем виде:

$$П = K + K_{от} + Z_{ок} \cdot 0,024 \cdot \frac{ГСОП}{R_о^{пр}} \cdot C_T \quad (2)$$

В формуле (2) подробнее расписаны годовые затраты на компенсацию потерь теплоты и введен дополнительный член $K_{от}$ - единовременные затраты на систему отопления и подключение к сетям в пересчете на 1 м² конструкции. Этот дополнительный член необходим, так как во многих случаях он оказывает значительное влияние на результаты расчетов. $K_{от}$ требует особой аккуратности при расшифровке, так как нужно выделить часть отопительной системы, приходящуюся на 1 м² исследуемой конструкции, что может вызвать затруднения.

Выражение $0,024 \cdot \frac{ГСОП}{R_о^{пр}}$ в формуле (2) – это количество энергии проходящей через 1 м² ограждающую конструкцию за отопительный сезон в кВт·ч/м²

C_T – цена тепловой энергии, руб./кВт ч.

Стоимость части отопительной системы, приходящаяся на 1 м² исследуемой конструкции, очевидно, зависит от тепловых потерь через эту конструкцию и может быть записана в следующем виде:

$$K_{от} = 0,024 \cdot \frac{ГСОП}{R_о^{пр}} \cdot C_{от} \quad (3)$$

где $C_{от}$ – удельная цена отопительного оборудования и подключения к тепловой сети, руб./(кВт ч/год).

Для удобства представления функции Π вводится климатический коэффициент, определяемый по формуле:

$$m_{\text{кл}} = \frac{ГСОП}{ГСОП(\text{Э})} \quad (4)$$

Выбор ГСОП(Э) достаточно произвольный. Для оптимизации расчетов предлагается принять ГСОП(Э) = 1000 °С сут./год, что примерно соответствует условиям г.Сочи (при $t_e = 20^\circ\text{C}$).

В результате формула (2) преобразуется к виду:

$$\Pi = K + 24 \cdot \frac{m_{\text{кл}}}{R_o^{\text{пр}}} \cdot [C_{\text{ом}} + Z_{\text{ок}} \cdot C_T] \quad (5)$$

Для учета сложного состава ограждающих конструкций воспользуемся элементарным подходом к тепловой защите ограждающих конструкций.

В соответствии с [5] (или подробнее [6]) ограждающую конструкцию можно представить как набор независимых элементов влияющих на тепловые потери. В этом случае, приведенное сопротивление теплопередаче находится по формуле (Е.1) из [5], а обратная величина по формуле:

$$\frac{1}{R_o^{\text{пр}}} = \sum a_i U_i + \sum l_j \Psi_j + \sum n_k \chi_k \quad (6)$$

где U_i – коэффициент теплопередачи однородной i -той части фрагмента теплозащитной оболочки здания, Вт/(м²·°С);

a_i – удельная площадь плоского элемента конструкции i – го вида, м²/м²;

Ψ_j – удельные потери теплоты через линейную неоднородность j -ого вида, Вт/(м°С);

l_j – удельная протяженность линейной неоднородности j -го вида, м/м²;

χ_k – удельные потери теплоты через точечную неоднородность k -го вида, Вт/°С;

n_k – удельное количество точечных неоднородностей k -го вида, шт/м².

Элементный подход также позволяет записать удельные единовременные затраты на производство 1 м² конструкции, руб/ м², как сумму стоимостей теплозащитных элементов и их монтажа:

$$K = K_0 + \sum a_i K_i^{nl} + \sum l_j K_j^{лин} + \sum n_k K_k^{точ} \quad (7)$$

где K_i^{nl} , $K_j^{лин}$, $K_k^{точ}$ – удельные единовременные затраты на закупку и монтаж единицы плоского, линейного и точечного теплозащитного элемента соответственно, руб/м², руб/м, руб/шт. Иногда в удельных единовременных затратах приходится кроме затрат на закупку и монтаж учитывать сопутствующие траты. Например, увеличение толщины утеплителя вызывает постепенное удорожание откосов, дюбелей, кронштейнов и т.п.

K_0 – начальные удельные единовременные затраты, т.е. затраты которые не зависят от уровня тепловой защиты конструкции, руб/м². Например, затраты на облицовку, некоторые несущие конструкции и т.п.

После подстановки выражения (6) и (7) в формулу (5), получается функция приведенных затрат на 1 м² ограждающей конструкции, зависящая от характеристик каждого теплозащитного элемента. Изменение одного или нескольких элементов приводит к изменению функции Π . Таким образом, в сформулированной постановке задачи удается учесть сложность ограждающих конструкций и дискретность

изменения параметров. Так как теплозащитные элементы принимаются независимыми друг от друга, функция Π оказывается функцией определенной на многомерном множестве дискретных переменных. У такой функции производная не определена, но экстремумы есть.

Условия минимума функции приведенных затрат.

Для решения задачи оптимизации тепловой защиты ограждающей конструкции требуется найти точку, в которой достигается наименьшее значение функции Π . При этом само значение минимума не столь важно, оно понадобится только для сравнения между собой качественно отличающихся конструкций.

Вычислим приращение функции Π при минимальном изменении одной из независимых переменных. Для определенности в качестве изменяемой переменной выберем точечный теплозащитный элемент под номером 1. Очевидно, что изменение теплозащитного элемента будет приводить одновременно к изменению χ_1 и K_1^{moch} . Различные значения одного и того же теплозащитного элемента будем обозначать верхним индексом, причем заранее договоримся, что все варианты упорядочены по удельным тепловым потерям в порядке убывания, т.е. чем больше верхний индекс, тем меньше удельные тепловые потери и больше удельные единовременные затраты³.

Вычтем из приведенных затрат конструкции с более «теплым» вариантом элемента 1 (обозначим его верхним индексом k), приведенные затраты конструкции с более «холодным» вариантом (обозначим его верхним индексом $k-1$). Все члены формулы (5) не содержащие χ_1

³ Увеличение единовременных затрат с уменьшением удельных тепловых потерь здесь принимается по умолчанию, хотя оно требует дополнительного упорядочивания всего множества вариантов выбранного теплозащитного элемента. Это упорядочивание достаточно очевидно и всегда выполнимо. Здесь оно не объясняется подробно для краткости и цельности основного изложения.

и K_1^{moch} сократятся. Останется только разность приведенных затрат са-
мого точечного элемента 1.

$$\Delta\Pi(\chi_1^{k-1,k}) = n_1 \Delta K_1^{moch-k-1,k} + 24 \cdot m_{\text{кл}} \cdot n_1 \Delta \chi_1^{k-1,k} \cdot [C_{om} + Z_{ок} \cdot C_T] \quad (8)$$

где введены обозначения

$$\Delta K_1^{moch-k-1,k} = K_1^{moch-k} - K_1^{moch-k-1} \quad (9)$$

$$\Delta \chi_1^{k-1,k} = \chi_1^k - \chi_1^{k-1} \quad (10)$$

При выбранном упорядочивании, очевидно, что ΔK всегда по-
ложительна, а $\Delta \chi$ всегда отрицательна. Чтобы четче представить из-
менение $\Delta\Pi$ при переходе от выбранного варианта теплозащитного
элемента к следующему перегруппируем члены в формуле (8):

$$\Delta\Pi(\chi_1^{k,k+1}) = 24 \cdot n_1 \left| \Delta \chi_1^{k,k+1} \right| \left(\frac{\Delta K_1^{moch-k,k+1}}{24 \left| \Delta \chi_1^{k,k+1} \right|} - m_{\text{кл}} \cdot [C_{om} + Z_{ок} \cdot C_T] \right) \quad (11)$$

Анализ показывает, что функция (11) возрастает с увеличением
тепловой защиты точечного элемента 1 и начинается отрицательными,
а заканчивается положительными значениями. Минимум функции
приведенных затрат по выбранной переменной будет при переходе
функции (11) через ноль. Таким образом, точка достижения минимума
приведенных затрат полностью определяется выражением в скобках.

Выражение в скобках сгруппировано так, что уменьшаемое за-
висит только от характеристик конструкции (как теплотехнических,
так и экономических), а вычитаемое зависит только от характеристик
района строительства и экономической ситуации. Отделение характе-
ристик конструкции от иных характеристик важно для возможности
дальнейшего обобщения и анализа получаемых результатов. Полу-

ченные в скобках выражения столь важны для создаваемого метода, что для них вводится специальное обозначение, а именно:

Удельные единовременные затраты на экономию энергетической единицы, руб./($\text{kBт}\cdot\text{ч}$ /год).

$$\Omega_{\chi_1}^{k+1} = \frac{\Delta K_1^{\text{точ-}k,k+1}}{24|\Delta\chi_1^{k,k+1}|} = -\frac{\Delta K_1^{\text{точ-}k,k+1}}{24\Delta\chi_1^{k,k+1}} \quad (12)$$

Удельная прибыль от экономии энергетической единицы, руб./($\text{kBт}\cdot\text{ч}$ /год).

$$\Omega_{np} = m_{\text{кл}} \cdot [C_{\text{от}} + Z_{\text{ок}} \cdot C_T] \quad (13)$$

В дальнейшем они используются как самостоятельные характеристики конструкции и района строительства.

Если бы функция Π зависела только от выбранного теплозащитного элемента, ее минимум достигался бы при переходе функции от убывания к возрастанию, т.е. при смене знака $\Delta\Pi$ с минуса на плюс. Для непрерывной функции это означает равенство $\Delta\Pi$ нулю. В нашем случае дискретной функции Π , аналогом будет максимальная близость $\Delta\Pi$ к нулю, т.е. близость $\Omega_{\chi_1}^{k+1}$ к Ω_{np} .

Рассмотрев влияние на приращение функции приведенных затрат любого другого теплозащитного элемента, мы получим соответствующие характеристики и требование их максимальной близости. Причем во всех случаях Ω_{np} будет одна и та же (что вполне естественно, так как это характеристика климатического района и экономической ситуации, которые при рассмотрении другого теплозащитного элемента остаются прежними).

По определению существуют теплозащитные элементы трех видов, поэтому и удельные единовременные затраты на экономию энергетической единицы будут выражены тремя сходными формулами.

Для плоского элемента

$$\Omega_U^k = -\frac{K^{\text{пл_k}} - K^{\text{пл_k-1}}}{24 \cdot [U^k - U^{k-1}]} \quad (14)$$

Для линейного элемента

$$\Omega_\Psi^k = -\frac{K^{\text{лин_k}} - K^{\text{лин_k-1}}}{24 \cdot [\Psi^k - \Psi^{k-1}]} \quad (15)$$

Для точечного элемента

$$\Omega_\chi^k = -\frac{K^{\text{точ_k}} - K^{\text{точ_k-1}}}{24 \cdot [\chi^k - \chi^{k-1}]} \quad (16)$$

Функция приведенных затрат, как функция нескольких переменных достигает минимума при одновременном достижении минимума по всем переменным, что в данном случае означает требование максимальной близости удельных единовременных затрат на экономию энергетической единицы всех теплозащитных элементов конструкции к удельной прибыли от экономии энергетической единицы.

Предварительные выводы и введение классификации.

Элементный подход к расчету приведенного сопротивления теплопередаче позволяет представить ограждающую конструкцию, как множество наборов элементов ее составляющих. Конструкция в исследовании представляется облаком вариантов в многомерном пространстве, где размерность пространства соответствует количеству независимых элементов конструкции.

Оптимизация конструкции представляет собой процедуру поиска минимума некой функции на множестве вариантов конструкции. Заметим, что это множество дискретных вариантов. Для разных климатических и экономических условий минимизируемая функция (приведенные затраты) будет различна. Т.е. для каждой конструкции существует не один оптимальный вариант, а несколько, по одному для каждого климатических и экономических условий. Все оптимальные варианты конструкции попадают в подмножество, процедура нахождения которого описана далее. Члены подмножества названы гармонично утепленными конструкциями.

Практический вывод из проведенного исследования следующий.

Для повышения эффективности энергосберегающих мероприятий следует при проектировании ограждающих конструкций стремиться к сближению значений удельных единовременных затрат на экономию энергетической единицы для всех теплозащитных элементов конструкции. Наиболее энергоэффективными будут конструкции с одинаковыми значениями удельных единовременных затрат на экономию энергетической единицы для всех ее элементов. Так как эти значения для технически выполнимых вариантов утепления элементов конструкции представляют собой дискретный ряд, очевидно, что строгого математического равенства добиться не удастся, но это и не требуется, учитывая фактическую приблизительность данных расчетов. Если исследовать функцию приведенных затрат, то можно заметить, что ее минимум всегда размыт и определять по нему конкретную точку с конкретным приведенным сопротивлением теплопередаче конструкции не имеет смысла.

Для практического использования достаточно приближенного равенства всех удельных единовременных затрат на экономию энергетической единицы конструкции, которое фиксируется попаданием всех значений на один отрезок. Чтобы формализовать приближенное равенство, предлагается ввести классификацию вариантов элементов конструкции по удельным единовременным затратам на экономию энергетической единицы, разбив все множество значений на отрезки.

Таблица 1.

Классы энергоэффективности элементов конструкции.

Класс	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Границы $\Omega_{эл}$, руб./($\text{kBт}\cdot\text{ч}$ /год)	<2	от 2 до 4	от 4 до 8	от 8 до 14	от 14 до 24	от 24 до 40	от 40 до 65	от 65 до 100	от 100	от 160	от 250	от 380	от 570	от 850
														>850

Следует отметить, что данная классификация сама по себе не может служить для суждения о предпочтительности отдельного элемента на основании его соответствия тому или иному классу. Предложенная классификация элементов конструкции может быть использована только при проектировании всей ограждающей конструкции энергоэффективного здания.

Наиболее энергоэффективными будут ограждающие конструкции, элементы которых относятся к одному классу энергоэффективности (технический аналог математического равенства). Поэтому для них предлагается ввести специальный термин.

Определение: *гармонично утепленной* называется ограждающая конструкция, все элементы которой относятся к одному классу

энергоэффективности. Этот же класс энергоэффективности является характеристикой и всей конструкции.

В настоящее время гармонично утепленные ограждающие конструкции практически отсутствуют, и требуется целенаправленная работа по созданию таких конструкций. Их использование является предпочтительным, поскольку они дают максимальный энергосберегающий эффект при равных затратах.

Определение: *гармонично утепленной* называется оболочка здания, состоящая из гармонично утепленных ограждающих конструкций одного класса. Этот же класс энергоэффективности является характеристикой и всей оболочки здания.

По настоящему энергоэффективные здания возможно построить только с гармонично энергоэффективной оболочкой.

Заключение.

Проведенное исследование позволяет сформулировать простой инженерный метод оптимизации ограждающих конструкций. Причем практически всю работу по оптимизации можно проводить до выбора конкретного района строительства, заранее, что очень важно.

Введенная характеристика, по сути, стоимость энергосберегающих мероприятий необходимых на экономии 1 кВтч в год, для эталонных климатических условий ГСОП(Э). Она введена таким образом, что легко обобщается на любые энергосберегающие мероприятия. Такой подход позволяет в едином ключе проводить оптимизацию не только отдельной конструкции или оболочки здания, но и всего здания в целом, требуя одного класса энергоэффективности как от теплозащитных элементов, так и от рекуператоров, солнцезащитных мероприятий, теплообменников и т.д.

Литература.

1. Сокольский В.А. «Принципы экономичности и их выражение в современном строительстве», С.-Петербург, 1910.
2. Гагарин В.Г. «Экономический анализ повышения уровня теплозащиты ограждающих конструкций зданий». // Строительные материалы. 2008. №8. С. 41-47.
3. Богуславский Л.Д. Снижение расхода энергии при работе систем отопления и вентиляции. М., Стройиздат, 1985.
4. Васильев Г.П. Эффективная теплозащита – дань моде или экономическая необходимость? // Энергосбережение. 2011, №6, стр.14-22.
5. СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003».
6. Гагарин В.Г., Козлов В.В. «Теоретические предпосылки расчета приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций». // Строительные материалы. 2010. №12. С. 4 – 12.

Аннотация

Проведено исследование экономики тепловой защиты при рассмотрении конструкции как сложной системы множества элементов. Введены новые характеристики элементов конструкции и района строительства. Введена классификация энергоэффективности элементов ограждающей конструкции. Сформулированы условия достижения минимума функции приведенных затрат. Из всего множества вариантов конструкций выделено подмножество, содержащее все оптимальные конструкции. Заложены основы инженерного метода.