



CALCULATION OF ECONOMICALLY OPTIMAL HEAT TRANSFER COEFFICIENT FOR FENCING ELEMENTS OF BUILDINGS WITH RENEWABLE ENERGY (RE) HEAT SUPPLY

Vladimir ERMURATSCHII¹, Nicolai EREMENKOV², Cristina EFREMOV²

¹Institute of Power Engineering of the Academy of Sciences of Moldova

²S.A. "GRADIENT-CO"

Annotation. The work is dedicated to the presentation of models needed for the calculation of economically optimal criteria for heat transfer coefficients for fencing elements in terms of the heating season. The models take into account climate, financial and economic conditions in the calculation of these quantities for opaque and transparent insulation of the building, taking into account the price of combined thermal energy heat source. The proposed model allows determining the optimal thickness of insulation and heat transfer coefficients for the already built and designed houses. For optimal thermal protection parameters of the building, are calculated dynamic economic performance indicators of investment: payback period, internal rate of return, discounted profitability of the project, reduced net income. The basis of the calculation method is considered the principle of minimizing reduced costs in assessing the effectiveness of investment projects. The problem is solved with the help of authors' specially designed software, using the actual bank rate to discount and forecast growth rate of prices of conventional thermal energy. The proposed method is illustrated by an example calculation for the city of Chisinau optimal heat transfer coefficients for the walls of the building with heat supply from boiler on the natural gas and wind power equipment. The optimal thickness of the load-bearing walls and insulation of different materials, optimum design of windows, as well as the specific loss of heat during the heating season, are determined.

Keywords: Reduces heat transfer coefficients, energy efficiency, outside fencing of bulidings, warming, economic efficiency.

CALCULAREA COEFICIENȚILOR OPTIMI DE TRANSFER TERMIC PENTRU ELEMENTELE DE PROTECȚIE EXTERIOARĂ ALE CLĂDIRII PRIVIND ALIMENTAREA CU CĂLDURĂ PRIN UTILIZAREA SURSELOR REGENERABILE DE ENERGIE DIN PUNCT DE VEDERE ECONOMIC

Vladimir ERMURATSCHII¹, Nicolai EREMENKOV², Cristina EFREMOV²

¹Institutul de Energetică Academia de Științe a Moldovei

²S.A. "GRADIENT-CO"

Abstract. Lucrarea este dedicată prezentării modelelor necesare pentru calcularea coeficienților optimi de transfer termic, conform criteriilor economice, pentru elementele de protecție exterioară, în baza termenilor perioadei de încălzire. În modele se iau în considerație clima și condițiile economico-financiare, la calcularea acestor valori pentru protecțiile exterioare opace și transparente ale clădirilor, ținând cont de prețul energiei termice a sursei de alimentare cu căldură combinată. Modelele propuse permit determinarea grosimii optime a izolației termice și a coeficienților de transfer termic pentru clădirile deja construite și a celor proiectate. Pentru parametrii optimi de protecție termică a clădirii se calculează indicatorii dinamici economici de eficiență ai investiției: perioada de amortizare, rata internă de rentabilitate, rentabilitatea actualizată a proiectului, venitul net redus. La baza metodei de calcul examinate se află principiul minimizării costurilor reduse la evaluarea eficienței proiectelor de investiții. Problema se rezolvă cu ajutorul unor programe de asigurare speciale, concepute de autori, utilizând rata bancară reală pentru actualizarea și prognozarea ratei creșterii prețurilor energiei termice convenționale. Metoda propusă este ilustrată printr-un exemplu de calcul, pentru or. Chișinău, a coeficienților optimi de transfer de căldură pentru pereții clădirii prin alimentarea cu energie termică de la centrale termice pe gaz natural și instalații eoliene. Este determinată grosimea optimă a pereților portanți și a izolației, din diferite materiale, construcții optime ale ferestrelor, precum și pierderi specifice de căldură în timpul perioadei de încălzire.

Cuvinte cheie: Coeficienți reduși de transfer termic, eficiența energetică, protecție exterioară a clădirii, izolație termică, eficiență economică.

РАСЧЁТ ЭКОНОМИЧЕСКИ ОПТИМАЛЬНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ЭЛЕМЕНТОВ НАРУЖНОГО ОГРАЖДЕНИЯ ЗДАНИЯ ПРИ ТЕПЛОСНАБЖЕНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИЭ

В.В.Ермуратский¹, Н.Г.Ерёменков², К.М.Ефремова²

¹Институт энергетики Академии Наук Молдовы

²Градиент-К

Аннотация. Работа посвящена изложению моделей, необходимых для расчёта оптимальных по экономическим критериям коэффициентов теплопередачи элементов ограждения по условиям отопительного периода. В моделях учитываются климатические и финансово-экономические условия при расчёте этих величин для непрозрачного и прозрачного ограждения здания с учётом цены тепловой энергии комбинированного источника теплоснабжения. Предложенные модели позволяют определять оптимальные толщины утеплителей и коэффициенты теплопередачи для уже построенных и проектируемых домов. Для оптимальных параметров защиты здания рассчитываются динамические экономические показатели эффективности инвестиций: срок окупаемости, внутренняя норма рентабельности, дисконтированная рентабельность проекта, приведенный чистый доход. В основе рассмотренного метода расчёта лежит принцип минимизации приведенных затрат при оценке эффективности инвестиционных проектов. Задача решается с помощью разработанного авторами специально программного обеспечения с использованием реальной банковской ставки для дисконтирования и прогнозного темпа роста цены традиционной тепловой энергии. Предложенный метод иллюстрируется примером расчёта для г. Кишинёва оптимальных коэффициентов теплопередачи для стен дома при теплоснабжении от котельной на природном газе и ветроэнергетической установки. Определены оптимальные толщины несущих нагрузку стен и утеплителя из разных материалов, оптимальную конструкцию окон, а также удельные потери тепла в отопительный период.

Ключевые слова. Приведенные коэффициенты теплопередачи, энергетическая эффективность, наружное ограждение дома, утепление, экономическая эффективность.

ВВЕДЕНИЕ

Задача экономической оптимизации теплоизоляции различных объектов является всё более актуальной в связи с необходимостью экономии энергетических ресурсов и защиты окружающей среды. Обеспечение энергетической эффективности построенных и проектируемых зданий является важной государственной задачей, основные положения которой отражены в Законе об энергетической эффективности зданий №128 от 11.07.2014. Этот закон транспонирует аналогичного названия Директиву 2010/31/ЕС Европейского Парламента и Совета от 19 мая 2010 г. Во всём мире, начиная с первого энергетического кризиса (начало 80-х годов 20 века) проводятся исследования и работы по нормированию уровня тепловой защиты зданий [1,2]. Одним из путей решения этой задачи является улучшение уровня теплоизоляции домов. Причём, эта задача актуальна не только для мест с холодным климатом, но и для тёплых стран, где минимизируются расходы на кондиционирование. Решению этой задачи для зданий разного назначения и использующих различные виды энергии посвящены многочисленные исследования, примером которых может быть работа [3]. Определение оптимальной теплоизоляции важно не только для вновь строящихся зданий, но в даже большей степени для зданий старой постройки, которых большинство в разных странах мира [2]. Эта задача существует в различных отраслях техники, например, расчёт оптимальной толщины теплоизоляции компонентов гелиотермических установок рассмотрен в работе [4]. В ней

используется известный метод минимизации приведенных расходов при оценке эффективности инвестиционных проектов в энергосберегающие мероприятия [5]. В работе [6] рассмотрено определение тепловых потерь здания с подробным расчётом термических сопротивлений конструкций элементов. При этом проектирование ведётся с использованием нормативных материалов [7]. Вместе с тем, работ, посвящённых определению оптимальных по экономическим критериям коэффициентов теплопередачи ограждения зданий при их теплоснабжении с использованием ВИЭ, практически нет.

В данной статье излагаются методические основы расчёта оптимальных коэффициентов теплопередачи с учётом стоимости единицы энергии комбинированного теплоснабжения. Энергосберегающие технические решения должны не только приводить к уменьшению потребляемой зданиями энергии, но и быть окупаемыми. Поэтому здесь рассматривается оптимизация, основанная на оценке экономических показателей их эффективности [5]. Зная приведенные коэффициенты теплопередачи элементов наружного ограждения, а также дополнительные потери тепла за счёт инфильтрации и вентиляции, могут быть рассчитаны основные показатели для здания – удельное потребление тепловой энергии, приходящееся на 1м² площади и 1м³ объёма [6], а также определён энергетический класс здания [7].

РАЗДЕЛ 1. ОПТИМИЗАЦИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ НЕПРОЗРАЧНОГО ОГРАЖДЕНИЯ ЗДАНИЯ.

В основу расчёта оптимальных коэффициентов теплопередачи здания положены методики, изложенные в работах [5,6]. Задача состоит в том, чтобы определить оптимальные параметры конструкций ограждения здания, которые должны отвечать требованиям нормативных документов [7].

Одной из подзадач является расчёт оптимальной по экономическим критериям толщины ограждения здания. Зная оптимальную толщину ограждения можно определить оптимальный для данного материала коэффициент теплопередачи, удельные потери тепла, а также экономические показатели, например, срок окупаемости, а также суммарную экономию затрат на отопление здания за срок его жизни.

Для упрощения решения поставленной задачи используем модель стационарной теплопередачи для расчета трансмиссионных тепловых потерь здания и примем следующие допущения:

1. Полагается, что потери тепла из здания в отопительный период компенсируются покупной энергией, т.е. теплопоступления в здание от внутренних источников и солнечной энергии через ограждение не учитываются.
2. Стоимость 1 м^2 ограждающей конструкции стен и крыши пропорциональна толщине материала и не содержит постоянной составляющей.
3. Рассматривается однослойная однородная структура ограждения с непрерывно изменяющейся толщиной ограждения.

Удельные потери тепловой энергии (E , кВтч/м^2) за один отопительный период через 1 м^2 площади непрозрачного ограждения здания рассчитываются по следующей формуле [6]:

$$E = 0,024Dd / (L / \lambda + R) \quad (1)$$

где Dd – градусо - сутки отопительного периода; λ – удельный коэффициент теплопроводности материала ограждения; L – толщина материала ограждения; R – тепловое сопротивление между внутренней частью здания и окружающей средой при $L=0$.

Приведенным коэффициентом теплопередачи здесь является величина равная $1/(L/\lambda + R)$. Сопротивление R является суммой сопротивлений теплопередачи между внутренней средой дома и внутренней поверхности ограждения (R_B), а также между наружной поверхностью ограждения и окружающей средой (R_H на Рис. 1):

$$\Delta = M_{\Sigma} / K \quad (2)$$

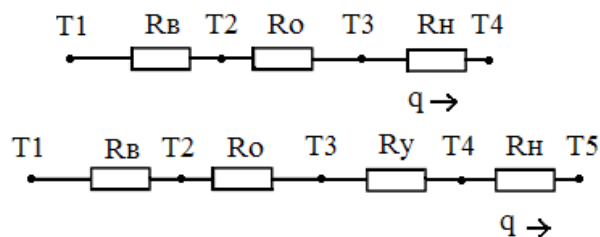


Рис.1 Электротепловые модели стационарной теплопередачи ограждения здания без утеплителя и с утеплителем.

Тепловые сопротивления R_O и R_Y являются сопротивлениями теплопроводности, и они равны отношению толщин к удельному коэффициенту теплопроводности материалов соответственно ограждению и утеплителя. На рис.1 символами T_1 ; T_2 ; T_3 ; T_4 и T_5 обозначены температуры в узлах электротепловых моделей, а символом q – приведенный (удельный) тепловой поток (Вт/м^2).

Значения тепловых сопротивлений R_1 и R_3 определяются по условиям конвективного и радиационного теплообмена в соответствующей физической модели здания [6]. Ориентировочно расчётное значение теплового сопротивления R находится в пределах $0,19 - 0,22 \text{ } ^\circ\text{См}^2/\text{Вт}$. Обычно этим сопротивлением пренебрегают, полагая, что оно существенно меньше теплового сопротивления ограждения R_O . Для хорошо изолированных домов это допущение не приводит к большим ошибкам, однако, для старых домов и прозрачных ограждений тепловые сопротивления R и R_O могут быть соизмеримыми.

Рассмотрим оптимизацию непрозрачного ограждения здания как энергосберегающее техническое решение, направленное на уменьшение потерь тепловой энергии в отопительный период.

Приведенное значение стоимости энергии, ушедшей в окружающую среду, через 1 м^2 ограждения здания за все отопительные периоды в интервале экономического анализа, рассчитывается по следующей формуле [5]:

$$C_{T1} = C_y E \bar{T} \quad (3)$$

где C_y – цена тепловой энергии в нулевой год экономического анализа; \bar{T} – интервал приведения доходов и затрат, расчёт которого рассмотрен в разделе 3.

В свою очередь затраты на 1 м^2 ограждения можно рассчитать по следующему выражению:

$$C_{T2} = C_{y0}L + C_d \quad (4)$$

где C_{y0} – стоимость 1 м^3 материала ограждения; C_d – дополнительная стоимость ограждения; L – толщина ограждения.

Суммарные приведенные затраты на ограждение здания и отопление (в интервале \bar{T}) можно представить в следующем виде:

$$3 = C_{T1} + C_{T2} \quad (5)$$

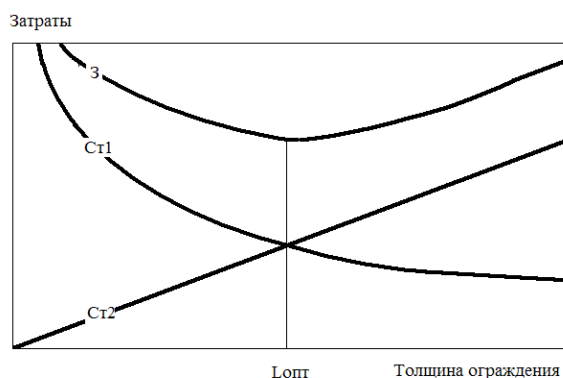


Рис 2. Зависимости приведенных затрат от толщины ограждения

На рис.2 эти величины (при $C_d = 0$) показаны в зависимости от толщины ограждения. На рис.2 эти величины показаны в зависимости от толщины ограждения. Из этого рисунка видно, что при малой толщине ограждения приведенные затраты на отопление здания превышают стоимость C_{T2} , а при большой картина обратная ($C_{T1} < C_{T2}$). Максимальные затраты на отопление будут при $L = 0$, т.к. в этом случае приведенный коэффициент теплопередачи ограждения минимален и равен $1/R$. При увеличении толщины ограждения здания приведенный коэффициент теплопередачи и потери тепловой энергии снижаются, но одновременно в соответствии с формулой (3) растут затраты на ограждение. При некоторой толщине ограждения, являющейся экономически оптимальной, эти затраты становятся равными, и дальнейшее увеличение толщины ограждения не компенсирует снижение потерь тепла, а приводит к росту затрат (кривая 3 на рис.2).

Очевидно, что экономией затрат на отопление здания будет разность между C_{T1} при нулевой толщине ограждения и при $L > 0$. Приравняв нулю первую производную от суммарных затрат, и полагая $R=0$, получим формулу для расчёта значения оптимальной толщины ограждения (L_{OPT}), при которой суммарные затраты минимальны:

$$L_{OPT} = (0,024DdC_y \lambda / C_{y0})^{0,5} \quad (6)$$

Увеличение C_{y0} или (и) снижение C_y обуславливает повышение L_{OPT} и противоположную тенденцию при использовании дорогого ограждения и дешёвой тепловой энергии. Учёт сопротивления R приводит к несколько меньшему значению оптимального значения толщины ограждения L , что следует из формулы (6):

$$L_{OPT} = (0,024DdC_y \lambda / C_{y0})^{0,5} - R\lambda \quad (7)$$

Из формул (5) и (6) видно, что основные факторы, влияющие на толщину ограждения, это: число градусо-суток в отопительный период, цена тепловой энергии, длительность периода приведения затрат, удельный коэффициент теплопроводности материала ограждения, цена 1м^3 материала ограждения.

Реальная конструкция элементов здания обычно является многослойной, в частности, состоять из стены, несущей механическую нагрузку, и слоя утеплителя. Так, если известна толщина стены и её материал, формула для расчёта оптимальной толщины утеплителя следующая:

$$L_{ТИ} = (10^{-3}DdC_y \lambda_{ТИ} / C_{y0})^{0,5} - L_{СТ} \lambda_{ТИ} / \lambda_{СТ} \quad (8)$$

где $L_{СТ}$ и $\lambda_{СТ}$ – соответственно толщина стены и коэффициент теплопроводности материала стены; $\lambda_{ТИ}$ и C_{y0} – коэффициент теплопроводности и стоимость 1м^3 материала утеплителя. Очевидно, что утеплитель необходимо устанавливать только при $L_{ТИ} > 0$. Значение оптимальной толщины утеплителя, определяемое по этой формуле, не является точным, поскольку C_{y0} зависит также от толщины материала, а затраты C_{T2} (формула 3) содержат дополнительную составляющую, например стоимость работы по утеплению здания. Кроме того, реальные конструктивные материалы имеют дискретные значения параметров, влияющих на оптимальную толщину. Поэтому окончательные значения оптимальных толщин основного ограждения и утеплителя уточняются с учётом вышесказанных особенностей. Стоимость 1м^2 стены или другого элемента ограждения с утеплителем рассчитывается по формуле:

$$C_{T2} = C_{21} L_{СТ} + C_{22} L_{ТИ} + C_3 \quad (9)$$

где C_{21} и C_{22} – соответственно стоимости 1м^3 несущей стены и утеплителя; C_3 – стоимость изготовления 1м^2 такой конструкции, которая зависит от ряда факторов, в частности, от стоимости работ по возведению стены или установки утеплителя. Расчёты показывают, что учёт составляющей C_3 в удельной стоимости утеплителя приводит к снижению его оптимальной толщины.

Зная оптимальные толщины несущего нагрузку ограждения и утеплителя, легко определить оптимальные коэффициенты теплопередачи конструкций непрозрачного ограждения здания. Так, оптимальное значение приведенного коэффициента теплопередачи стены здания без утеплителя рассчитывается по следующей формуле:

$$K_{OPT} = 1 / (L_{OPT} / \lambda_{СТ} + R) \quad (10)$$

Оптимальное значение приведенного коэффициента теплопередачи стенки здания с утеплителем определяется для четырёх термических

сопротивлений, соединённых последовательно (Рис.1):

$$K_{\text{опт}} = 1/(L_{\text{ТИ}} / \lambda_{\text{ТИ}} + L_{\text{СТ}} / \lambda_{\text{СТ}} + R) \quad (11)$$

Реальная конструкция ограждения здания может содержать несколько слоёв материалов, имеющих различные коэффициенты теплопроводности (λ) и отличающиеся по удельной стоимости ($C_{\text{УО}}$), а также по толщине. В этом случае приведенные выше модели позволяют определить ориентировочные значения величин, а окончательный выбор оптимального варианта осуществляется путём сопоставления экономических показателей альтернативных конструкций.

Число градусо - суток отопительного периода рассчитывается по формуле, приведенной в работе[6]:

$$Dd = \sum(T_1 - T_2) \text{ЧД} \quad (12)$$

где T_1 – расчетная температура внутреннего воздуха здания; T_2 – среднемесячная температура окружающей среды; ЧД – число дней в месяце. Число градусо - суток зависит от T_2 , которая различна для разных элементов здания, и поэтому значение Dd разное для стен, крыши и пола первого этажа. Так, для Кишинёва число градусо - суток при температуре $T_1 = 20^\circ\text{C}$,без учёта внутреннего поступления тепла в здании за счёт работы оборудования и солнечной энергии через прозрачное ограждение здания, для стен составляет примерно 3040, а для пола первого этажа примерно в 2,4 раза меньше. Второй особенностью является то, что при расчёте числа градусо – суток для крыши дома температура T_2 будет ниже, чем для стен, из-за более низкой термодинамической температуры атмосферы [8]. Учёт влияния указанных выше теплоступлений на число градусо-суток можно осуществить путём подстановки в формулу (12) значения T_1 :

$$T_1 = T_N - \sum_i \sum_j K_i A_i Q_j \quad (13)$$

где T_N – расчётная температура внутри здания, зависящая от его назначения (жилое, детское учреждение, производственное, офисное и т.д.); K_i и A_i – соответственно приведенные коэффициенты теплопередачи и площади элементов ограждающих конструкций здания; Q_j – мощность теплоступления от j -го источника. Пренебрежение этими теплоступлениями будет приводить к избыточной тепловой защите здания и соответственно к повышенным затратам. Для нахождения оптимальных удельных коэффициентов теплопередачи непрозрачного ограждения здания в этом случае потребуются итеративный процесс, поскольку от T_1 зависит число градусо - суток, а на T_1 влияют K_i , зависящие от приведенных коэффициентов теплопередачи элементов конструкции здания.

Оптимизация толщин многослойной конструкции непрозрачного ограждения здания осуществляется

численно, учитывая дискретность исходных данных для различных материалов и необходимость уточнения значения T_1 .

РАЗДЕЛ 2. ОПТИМИЗАЦИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОЗРАЧНОГО ОГРАЖДЕНИЯ ЗДАНИЯ.

К прозрачному ограждению здания относятся окна, атриумы и другие части конструкции, через которые освещается внутреннее пространство. Эти элементы конструкции, имея небольшую относительно всего ограждения здания площадь, ответственны за значительную (до 40 и более процентов) долю потерь энергии из-за их большого коэффициента теплопередачи [6]. Удельные потери (E , кВтч) тепловой энергии через 1м^2 площади этих элементов за отопительный период рассчитываются по формуле:

$$E_{\text{по}} = 0,024Dd / (1/ K_i + R) \quad (14)$$

где K_i – приведенные коэффициенты теплопередачи конструкции прозрачного ограждения (U-value в англоязычной литературе), а R – тепловое сопротивление, определяемое по модели, приведенной на рис.1. При расчёте этой величины необходимо учесть, что конвективный коэффициент теплообмена воздуха и ограждением зависит от разности температур и ориентации ограждения [6].

Стоимость энергии, потерянной через 1м^2 прозрачного ограждения за отопительные периоды в интервале экономического анализа, определяется по формуле (2). В свою очередь затраты на 1м^2 прозрачного ограждения и K_i , зависят от его конструкции и страны производителя. Например, для окон с применением стеклопакетов более низкие значения приведенных коэффициентов теплопередачи обуславливают более высокую удельную стоимость C_{T2} (табл.1). Оптимальный коэффициент теплопередачи прозрачного ограждения также должен определяться по условию минимума приведенных затрат.

Таблица 1

Конструкция стеклопакета	K , Вт/м ² °C	C_{T2} , €/м ²
1. Два обычных стекла	3,1	64
2. Одно обычное стекло и одно LowE стекло	1,8	79
3. Три обычных стекла	1,85	76
4. Два обычных стекла и одно LowE стекло	1,47	91
5. Три LowE стекла с криптоном	0,6	350

Здесь также имеется два варианта задач: 1- это замена старых окон на более эффективные и 2- выбор оптимальной конструкции при проектировании здания. Эффекты и экономические показатели в этих двух случаях также как для стен будут разные.

Снижение затрат на отопление за счёт экономии тепловой энергии при замене 1 м^2 старых окон (K_1) на новые (K_2) определяется по формуле:

$$\text{ЭЗО} = 0,024DdC_v\bar{T}(K_1 - K_2) \quad (15)$$

Условие целесообразности этого энергосберегающего мероприятия формулируется просто: ЭЗО должно быть больше, чем затраты на замену 1 м^2 окон. Последняя величина определяется суммой стоимости 1 м^2 окна и работы по их замене. Из формулы (15) следует, что при прочих равных условиях экономия тем выше, чем больше разность между K_1 и K_2 .

При выборе окон для проекта нового дома экономический эффект рассчитывается также по формуле (14), используя при этом в качестве K_1 значение равное обратной величине теплового сопротивления R , о котором речь шла выше при обсуждении формулы (1). Следует отметить, что существует ещё несколько возможных вариантов снижения потерь тепла через прозрачные ограждения, одним из которых является применение светоотражающих жалюзи. Такое техническое решение может обеспечить существенную экономию затрат на отопление и дополнительно улучшить комфортность при естественном освещении помещений. Эффективность этого мероприятия также определяется по приведенным затратам. Оно может быть экономически более выгодным, чем замена старых окон на более современные окна.

Оптимизация приведенного коэффициента теплопередачи прозрачного ограждения здания осложняется тем, что значения этой величины, а также стоимость 1 м^2 не являются непрерывными, а принимают дискретные значения в зависимости от их конструкции. Поэтому оптимизацию необходимо выполнять численно, определяя минимальные и максимальные значения интервала, внутри которого должен находиться минимум целевой функции. Следует отметить, что численная оптимизация необходима также для конструкции непрозрачного ограждения здания, когда рассматриваются конструкции с дискретными значениями толщин материалов. Это относится, например, к зданиям с ограждением из известняка, кирпичей, блоков из материалов с пониженной теплопроводностью и т.д.

РАЗДЕЛ 3. ФИНАНСОВО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВИЭ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ ПРИ РАСЧЁТАХ ОПТИМАЛЬНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ.

Определение оптимальных приведенных коэффициентов теплопередачи элементов наружного ограждения мы рассматриваем как задачу по повышению энергетической эффективности здания. При этом, как отмечено выше, эта задача может решаться на этапе проектирования нового здания, или при определении целесообразности утепления существующего дома. Выполним расчёты

оптимальных коэффициентов теплопередачи для разных материалов и конструкций элементов наружного ограждения здания, необходимо найти их экономические показатели и выбрать оптимальные варианты. При этом здесь требуется оценить рассматриваемые конструкции с позиций эффективности инвестиций. В настоящее время экономическая эффективность инвестиционных проектов, к которым относятся проекты с использованием ВИЭ и энергосберегающих мероприятий, оценивается с помощью ряда показателей. Важнейшими из них являются: срок возврата инвестиций (срок окупаемости проекта), внутренняя норма доходности, рентабельность проекта, чистый доход за время жизни проекта [8,9,10]. В этих книгах изложены методические основы для расчёта экономических показателей инвестиционных проектов с использованием ВИЭ и энергосберегающих мероприятий. При этом учитываются: начальные инвестиции, текущие расходы, ожидаемые в будущем темпы роста цены традиционной энергии и существующих банковских ставок на финансовом рынке. Ниже рассмотрен вариант моделей для расчёта экономических показателей, когда проект полностью реализуется в течение одного года, а будущие экономии средств от снижения расходов на отопление одинаковы для всех лет интервала экономического анализа.

Особенностью комбинированного теплоснабжения домов от традиционных источников и ВИЭ является зависимость стоимости единицы тепловой энергии от их доли в теплоснабжении здания[8]:

$$C_{mэ} = (1 - F)C_3 + FC_4 \quad (16)$$

где F – доля теплоснабжения от ВИЭ; C_3 – цена энергии от традиционного источника; C_4 – цена энергии ВИЭ. В формулу (16) подставляются значения C_3 и C_4 принятые для нулевого года экономического анализа.

Тогда *годовая экономия* затрат на отопление при использовании ограждения без утеплителя (стена, имеющая оптимальную толщину), рассчитывается по следующей формуле:

$$\text{ЭЗО}_1 = 0,024DdC_{mэ}(1/R - \lambda_{CT}/L_{CT}) \quad (17)$$

где L_{CT} – толщина ограждения без утеплителя.

Годовая экономия затрат на отопление при использовании ограждения с утеплителем, имеющем оптимальную толщину, рассчитывается по следующей формуле:

$$\text{ЭЗО}_1 = 0,024DdC_{mэ}(1/R - \lambda_{CT}/L_{CT} - \lambda_y/L_y) \quad (18)$$

где R – минимальное приведенное тепловое сопротивление ограждения, определение которого излагалось в начале первого раздела статьи.

При установке утеплителя на существующий дом годовая экономия затрат на отопление будет определяться разностью потерь тепла до установки и после установки утеплителя:

$$\text{ЭЗО}_1 = 0,024DdC_{m_3}(1/R + \lambda_{CT}/L_{CT} - \lambda_y/L_y) \quad (19)$$

Экономия затрат на отопление за весь интервал экономического анализа ($T_{ЭА}$) без учёта изменения во времени покупательной способности денег и изменения цен на энергию определяется по формуле:

$$\text{ЭЗО} = T_{ЭА} \text{ЭЗО}_1 \quad (20)$$

При расчёте динамических показателей эффективности инвестиций в формулу (20) вместо $T_{ЭА}$ необходимо подставлять значение интервала приведения будущих доходов и затрат (\bar{T}) [9]:

$$\bar{T} = [1 - (1 + i_d)^{-T_{ЭА}}] / i_d \quad (21)$$

Тогда приведенное значение экономии затрат на отопление за счёт снижения удельных потерь тепла через любой элемент ограждения при его реконструкции определяется по формуле:

$$\begin{aligned} \text{ЭЗО} &= 0,024Dd_i C_y \bar{T} (K_u - K_p) \\ K_{опт} &= 1 / (L_{опт} / \lambda_{CT} + R) \end{aligned} \quad (22)$$

где Dd_i – расчётное число градусо-суток для данного элемента ограждения; K_u – исходный коэффициент теплопередачи; K_p – коэффициент теплопередачи после реконструкции.

Длительность интервала приведения затрат (\bar{T}) необходимо определять с учётом интервала экономического анализа ($T_{ЭА}$), а также темпов изменения цены на тепловую энергию C_3 [9,10]:

$$\bar{T} = [1 - (1 + i_d)^{-T_{ЭА}}] / i_d \quad (23)$$

где i_d – эффективная норма дисконта будущих доходов от экономии тепловой энергии; $T_{ЭА}$ – интервал экономического анализа (горизонт расчёта). Значение $T_{ЭА}$ обычно принимают равным сроку службы элемента конструкции, который определяется по нормативным показателям или по данным фирм-производителей [5]. Поэтому для разных элементов наружного ограждения здания значения $T_{ЭА}$ будут отличаться. В Европейских нормативах для окон $T_{ЭА} = 15$ лет, а для стенок здания $T_{ЭА} = 30$ лет [2]. Значение эффективной нормы дисконта в расчётах экономических показателей эффективности предлагается определять как прогнозное значение реальной банковской ставка по вкладам и темпа роста цены на тепловую энергию:

$$i_d = (i_c - i_T) / (1 + i_T) \quad (24)$$

где i_c – номинальная ставка; i_T – ожидаемый темп роста цены энергии, используемой на отопление дома.

Срок окупаемости инвестиций (DPP) в ограждение здания здесь определялся как интервал времени, при котором дисконтированный накопленный доход от экономии энергии на отопление здания становится равным начальным инвестициям. Его можно рассчитать путём итераций с использованием следующей формулы [9]:

$$C_{T2} / \text{ЭЗО}_1 = [1 - (1 + i_d)^{-DPP}] / i_d \quad (25)$$

где C_{T2} – начальные инвестиции в 1 м^2 ограждения; ЭЗО_1 – годовая экономия затрат на отопление (формулы 18 и 19).

Внутренняя норма рентабельности проекта по энергосбережению (IRR) необходимо также определять путём итераций, используя следующее выражение [9]:

$$C_{T2} / \text{ЭЗО}_1 = [1 - 1 / (1 + IRR)^{T_{ЭА}}] / IRR \quad (26)$$

Эта величина характеризует максимальную эффективную норму дисконта, при которой будущие доходы от энергосбережения за время $T_{ЭА}$ равны начальным инвестициям.

Чистый приведенный доход от экономии тепловой энергии на отопление за срок жизни проекта по энергосбережению рассчитывают по формуле [9]:

$$\text{NPV} = \bar{T} \text{ЭЗО}_1 - C_{T2} \quad (27)$$

Индекс рентабельности инвестиции рассчитывают, используя значения величин, полученных ранее по формуле [10]:

$$\text{PI} = \text{NPV} / C_{T2} \quad (28)$$

Обращаем внимание читателя, что приведенные выше формулы определяют показатели для 1 м^2 элемента ограждения. Для всего здания показатели будут пропорциональны площадям этих элементов.

Изложенный выше метод расчёта оптимальных коэффициентов теплопередачи стен рассмотрим на примере применения разных конструкций при комбинированном теплоснабжении жилого дома от ветроэнергетической установки ($F=0,4$) и котельной, работающей на природном газе. Исходные данные, которые использовались при расчётах, приведены в табл.2.

Таблица 2

Величина	Значение
Интервал анализа для стен, лет	30
Интервал анализа для окон, лет	15
Номинальная банковская ставка, %	7
Темп роста цены на природный газ, %	5
Коэффициент теплопроводности FS25, Вт/м ⁰ С	0,036
Коэффициент теплопроводности XPS, Вт/м ⁰ С	0,029
Коэффициент λ пиленного известняка, Вт/м ⁰ С	0,6
Коэффициент λ пенобетона Д500, Вт/м ⁰ С	0,11
Доля ВЭУ в теплоснабжении дома	0,4
Цена тепла котельной на ПГ, €/кВтч	0,045
Стоимость единицы тепла ВЭУ, €/кВтч	0,063
Стоимость 1м ³ пиленного известняка, €	30
Стоимость 1м ³ стены из пенобетона Д500, €	55
Стоимость 1м ³ утеплителя FS25, €	45
Стоимость 1м ³ утеплителя XPS, €	104
Дополнительная стоимость стены, €/м ²	5
Толщина стены без утеплителя, м	0,2

Результаты расчётов оптимальной толщины стены, утеплителя и приведенного коэффициента теплопередачи при $i_d = 0,047$ и $\bar{T} = 16$ лет приведены в табл. 3.

Результаты расчётов экономических показателей для разных стен при $i_d = 0,047$ и $\bar{T} = 16$ лет приведены в табл. 4.

Из данных табл.3 и 4 видно, что варианты конструкций стены дома существенно отличаются, в том числе, по значениям удельных потерь тепла за отопительный сезон (Е). Разумеется, что никто не будет применять вариант №1 с толщиной стены 0,92м, однако для этой конструкции это экономически оптимальная толщина.

Варианты 2,3,5 и 6 близки по удельным потерям тепла (~12 кВтч/м²), однако по параметрам экономической эффективности инвестиций наилучшими можно считать варианты конструкций 3 и 4. Результаты расчётов экономических показателей для окон дома при $i_d = 0,047$ и $\bar{T} = 10,6$ лет приведены в табл.5. Исходные данные для расчётов были приняты по табл.1 и 2. Из данных табл.5 оптимальными вариантами для условий г. Кишинёва являются второй и третий вариант конструкции окон с применением стеклопакетов, в которых используются 4мм стекла. Применение высокоэффективного 5-го варианта экономически невыгодно, несмотря на то, что годовые потери тепла (Е) у этого варианта почти в 2,5 раза меньше, чем у вариантов 3 и 4.

ВЫВОДЫ

1. Разработан метод расчёта оптимальной теплоизоляции зданий при их комбинированном теплоснабжении от традиционных и возобновляемых источников энергии с учётом дисконтирования и темпов роста во времени цены традиционной энергии, идущей на отопление.

- Наименьшие коэффициенты теплопередачи при прочих равных условиях достигаются в условиях самофинансирования при минимальных банковских ставках на кредиты и повышенным прогнозным значением инфляции цен на традиционную энергию.
- Теплоснабжение от ВИЭ с ценой на энергию более высокой, чем у традиционного источника, приводит к уменьшению коэффициентов теплопередачи ограждения здания. Коэффициенты теплопередачи ограждения могут быть более высокими, если теплоснабжение дома осуществляется от источников с низкой ценой тепловой энергии.
- Использование ВИЭ с ценой энергии более низкой, чем у традиционных источников, наиболее эффективно, поскольку экономится не только теплоизоляция, но и органическое топливо, что снижает итоговую за срок жизни дома нагрузку на окружающую среду.
- Дополнительное поступления тепла от внутренних источников и через наружное ограждение здания обуславливает возможность снижения уровня его теплоизоляции.
- В условиях Молдовы экономически нецелесообразно уменьшать приведенные коэффициенты теплопередачи наружного ограждения зданий до уровня, характерного для домов с низким потреблением энергии, рассматриваемых в ЕС.
- Наиболее экономически эффективными в условиях Молдовы являются окна в виде стеклопакетов с тремя обычными стёклами. Замена старых окон на окна с тремя стёклами экономически наиболее выгодно.
- При определении оптимальных коэффициентов теплопередачи необходимо учитывать коэффициенты теплообмена на внутренних и внешних поверхностях ограждения здания. Пренебрежение этим тепловым сопротивлением приводит к завышенным (на 15 -26%) требованиям по тепловой защите здания. При этом меньшее завышение имеет место для непрозрачного, а большее – для прозрачного ограждения.

ЛИТЕРАТУРА

- J. Laustsen, *Energy Efficiency Requirements in Buildings Bodes , Energy Efficiency Policies for new Buildings*. IEA Information Paper.2008.
- P.Murphy, M.I. Cedar, *IEA Solar Heating & Cooling Programme 2013 Annual Report*
- N. Daouas, *A study on optimum insulation thickness in walls and energy savings in Tunisian buildings based on analytical calculation of cooling and heating transmission loads*. Applied Energy 88 (2011) 156–164.
- В.В. Ермуратский, *Определение оптимальной толщины теплоизоляции компонентов геотермических установок*. Проблемы региональной энергетики. 2005. №1.
- А.Н.Дмитриев, Ю.А.Табунщиков, И.Н.Ковалев, Н. В.Шилкин, *Руководство по оценке экономической эффективности инвестиций в энергосберегающие мероприятия*. М.: АВОК-ИРЕСС, 2005.

6. Е. Г. Малявина, *Теплопотери здания*. Справочное пособие. М.«АВОК-ИРЕСС» 2007,-265с.
7. NCM E.04.01-2014 PROTECȚIA TERMICĂ A CLĂDIRILOR.
8. J. Duffie and W.Beckman, *Solar Engineering of Solar Processes*. - 3rd.ed. J.Wiley and Sons. 2006 - 908 pp.
9. T.Ambros ș.a., *Surse regenerabile de energie*. –Manual.Chșinău. Ed. „Tehnica – Info”, 1999-434p.
10. Е.М. Фрейдкина, *Методы и критерии оценки эффективности энергосбережения: учебное пособие* / СПбГТУРП. СПб., 2013. – 52 с. – ISBN-978-5-91646-068-1.

Таблица 3

Конструкция стены	L _{оп,м}		K _{оп, Вт/°См²}	E, кВтч/м ²
	L _{ст}	L _{ти}		
1.Пилёный известняк без утеплителя	0,92	0	0,65	47
2. Пилёный известняк с утеплителем FS25	0,2	0,2	0,16	11,5
3. Пилёный известняк с утеплителем XPS	0,2	0,14	0,12	12,6
4.Пенобетон Д500 без утеплителя	0,32	0	0,35	25
5. Пенобетон Д500 с утеплителем FS25	0,2	0,17	0,16	11,5
6. Пенобетон Д500 с утеплителем XPS	0,2	0,14	0,18	12,6

Таблица 4

Конструкция стены	DPP	IRR	NPV, €м ²	PI
1.Пилёный известняк без утеплителя	3,9	0,28	127	3,5
2. Пилёный известняк 0,2м с утеплителем FS25	3,5	0,32	69	4
3. Пилёный известняк 0,2м с утеплителем XPS	1,4	0,72	178	10
4.Пенобетон без утеплителя	2,3	0,46	156	6,3
5. Пенобетон Д500 с утеплителем FS25	18,9	0,07	4,2	0,29
6. Пенобетон Д500 с утеплителем XPS	19	0,07	3,8	0,27

Примечание: данные для вариантов 1-4 приведены для проектируемого дома, а данные для вариантов 5 и 6 приведены для случая реконструкции дома – утепление существующих стен.

Таблица 5

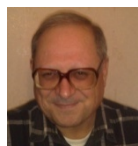
Конструкция окна	C _{T2} , €/м ²	DPP	IRR	NPV, €м ²	PI	E, кВтч/м ²
1. Два обычных стекла	64	13	0,6	5,4	0,084	241
2. Одно обычное стекло и одно LowE	79	7,8	0,13	52	0,65	135
3. Три обычных стекла	76	7,6	0,14	53	0,69	131
4. Два обычных стекла и одно LowE	91	8,2	0,12	53	0,58	107
5.Три LowE стекла с криптоном	350	73	-0,04	-170	-0,5	44
6.Замена варианта 1 на 3	76	6,6	0,16	69	0,91	241/131
7.Замена варианта 1 на 4	91	9,3	0,1	38	0,42	241/107

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Ермуратский Владимир Васильевич. Киевский Политехнический Институт, 1960-Центральные электрические станции, сети и системы. Институт энергетики Академии Наук Молдовы, главный научный сотрудник, доктор технических наук. Область научных интересов: возобновляемые источники энергии, солнечная энергетика,

энергетическая эффективность, теплоэнергетика, теплотехника. E-mail ermuratskie@gmail.com



Nicolai G. Eremenkov: Licensed engineer - Higher Engineering and Construction Institute, Department of Heat, Gas and Ventilation, Novosibirsk, Russia. The development of project and exploitation documents in regard to environment protection; Being a Chairman of the Technical Committee in Constructions under the State Institute of Metrology and Standardization,

I have an excellent knowledge on existing building legislation, energy efficient and construction standards and normative documents in the Republic of Moldova; author of a series of national normative documents (methodologies, SNIPs and GOSTs and standards) in construction and energy saving including the Heat Rehabilitation of Buildings and Energy Conservation.



Cristina M. Efremov: Master - Technical University of Moldova – Energetics and Electrical Engineering Faculty. Director on scientific sector S.A. "Gradient-Co", working on: schemes of heat supply to residential areas (towns, villages, etc.), various industries; boilermaking industrial heating and steam boiler technology with individual capacity to 50 tons of steam / hour;

thermal units; solar water heating systems; autonomous heat supply sources; loss of heat from technological equipment; energy efficiency in buildings; use made emissions of heat efficiency; steam supply technological equipment.