

Кузьмин Сергей Иванович,

к.т.н., доцент, Ангарский государственный технический университет,

e-mail: sergey.kuzmin@mail.ru

Камолова Екатерина Анатольевна,

магистрант, Ангарский государственный технический университет,

e-mail: pgs@angtu.ru

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ МЕРОПРИЯТИЙ ДЛЯ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ЖИЛОГО ЗДАНИЯ

Kuzmin S.I., Kamolova E.A.

ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF ENERGY-SAVING MEASURES FOR AN INDIVIDUAL RESIDENTIAL BUILDING

Аннотация. В работе представлены результаты анализа влияния энергосберегающих мероприятий на экономические характеристики индивидуального жилого здания. Разработана модель связи конструктивных параметров на основе модели системы водяного отопления индивидуального здания с его объёмно-планировочным решением.

Ключевые слова: энергосбережение, система отопления, мощность отопления, тепловая защита, моделирование технической системы.

Abstract. The paper presents the results of the analysis of the impact of energy-saving measures on the economic characteristics of an individual residential building. A model of the connection of structural parameters based on the model of the water heating system of an individual building with its space-planning solution.

Keywords: energy saving, heating system, heating power, thermal protection, technical system modeling.

Экономия тепловой энергии в здании сама по себе может представляться некой полезной самоцелью. Это соответствует установленному законодательству [1], стимулирует развитие новых производств, совершенствование и внедрение в практику строительства новых технологий.

Однако эффективность применения энергосберегающих мероприятий в здании необходимо оценивать по показателям, учитывающим дополнительные затраты на внедрение новых энергоэффективных материалов в конструкции внешней оболочки здания, теплоутилизирующего оборудования, на изменение планировки и уменьшение полезного объёма помещений, необходимость обслуживания и ремонта дорогостоящего оборудования и ожидаемой экономией от снижения теплопотребления, возможного удешевления самих теплопотребляющих систем в следствие уменьшения их расчётных показателей.

В настоящей работе представлены результаты анализа влияния теплосберегающих мероприятий по утеплению внешней оболочки на общую эффективность индивидуального жилого здания.

Оценку эффективности внедрения теплосберегающих мероприятий в жилом здании предлагается по минимуму приведённых затрат (в у.е./год) на теплотребляющую систему $\mathcal{E}_{\text{со}}$ и оболочку здания (стены и светопрозрачные ограждения) $\mathcal{E}_{\text{обол}}$:

$$\Delta \mathcal{E} = \mathcal{E}_{\text{со}} + \mathcal{E}_{\text{обол}}. \quad (1)$$

Основным потребителем, а, следовательно, и источником выработки (или потребления от внешнего источника) тепловой энергии в здании является система отопления. Для индивидуального здания, составляющие в выражении (1) могут быть представлены следующим образом:

$$\mathcal{E}_{\text{со}} = c_{\text{т}} \cdot W_{\text{т}} + \sum (Z_{\text{т}} \cdot k_{\text{т}}) + W_{\text{эл.т}} \cdot c_{\text{эл}}, \quad (2)$$

где $c_{\text{т}}$ и $c_{\text{эл}}$ – тариф на соответственно тепловую и электрическую энергию с учётом изменений за период эксплуатации оборудования, руб./кВт·ч;

$\Delta W_{\text{т}}$ – потребление тепловой энергии от внешнего источника за расчётный период, кВт·ч.;

$k_{\text{т}}$ – коэффициенты окупаемости оборудования системы отопления, год⁻¹;

$W_{\text{эл.т}}$ – потребление электрической энергии системой отопления за расчётный период, кВт·ч.

$Z_{\text{т}}$ – единовременные затраты на оборудование системы отопления, у.е.

Затраты на создание внешней оболочки здания выразятся следующим образом:

$$\mathcal{E}_{\text{обол}} = Z_{\text{об.к}} \cdot k_{\text{об.к}} + Z_{\text{об.ут}} \cdot k_{\text{об.ут}} + Z_{\text{ок}} \cdot k_{\text{ок}}, \quad (3)$$

где $Z_{\text{об.к}}$ и $Z_{\text{об.ут}}$ – единовременные затраты на устройство соответственно, конструктивной и утепляющей составляющих непрозрачной части оболочки, у.е.

$k_{\text{об.к}}$, $k_{\text{об.ут}}$ и $k_{\text{ок}}$ – коэффициенты окупаемости соответственно конструктивного и теплоизоляционного материалов оболочки, окон, год⁻¹.

Единовременные затраты на конструктивную часть оболочки $Z_{\text{об.к}}$ (у.е.) выразятся через полную стоимость материалов и строительных работ $c_{\text{к.м}}$ (у.е./м³) и их объём $V_{\text{к.м}}$:

$$Z_{\text{об.к}} = \sum V_{\text{к.м.}f} \cdot c_{\text{к.м.}f}, \quad (4)$$

где f – индекс вида конструктивного элемента оболочки.

Единовременные затраты на тепловую изоляцию $Z_{\text{об.ут}}$ (у.е.) выразятся через полную стоимость материалов и монтажных работ $c_{\text{и.м}}$ (у.е./м³) и их объём $V_{\text{и.м}}$:

$$Z_{\text{ут.и}} = c_{\text{и.м}} \cdot V_{\text{и.м}}. \quad (5)$$

Объём материалов зависит от степени утепления оболочки и её площади:

$$V_{\text{и.м.}f} = \sum (\delta_{\text{и.м.}f} \cdot A_f) = \sum \left(\frac{1}{K_{2,f}} \right) \cdot \lambda_{\text{и.м.}f} \cdot A_f, \quad (6)$$

где $\delta_{\text{и.м.}f}$ – толщина слоя изоляционного материала f -го вида оболочки (наружная стена, пол, потолок, и. т. п.), м;

A_f – площадь утепляемой части оболочки, м²;

K_f – коэффициенты теплопередачи f -го элемента оболочки, Вт/м² °С;

$\lambda_{и.м.f}$ – коэффициент теплопроводности материала f -го вида оболочки, Вт/м °С.

Увеличение сопротивления теплопередачи светопропускающих конструкций может сопровождаться увеличением их стоимости. Принимая, что конструкции окон в здании одинаковы, единовременные затраты на светопрозрачную оболочку $Z_{ок}$ примут вид:

$$Z_{ок} = c_{ок} \cdot 2 \cdot \bar{A}_o \cdot (V \cdot n_b^{-1} \cdot n_h^{-1})^{\frac{2}{3}} \cdot (n_b + 1) \cdot n_h, \quad (7)$$

где $c_{ок}$ – полная стоимость заполнения оконного проёма, у.е./м²;

\bar{A}_o – доля светопрозрачных проёмов в общей площади вертикальных ограждений;

V – отапливаемый объём здания внутри внешней оболочки, м³;

$n_b = a \cdot b^{-1}$ – отношение сторон здания в плане;

$n_h = h_{эт} \cdot n_{эт} \cdot a^{-1}$ – высота отапливаемого объёма здания этажностью $n_{эт}$ с высотой этажа $h_{эт}$ относительно большей стороны проекции здания в плане;

Единовременные затраты на систему отопления $Z_{со}$ определяются стоимостью оборудования и материалов и зависят от расчетной тепловой мощности системы $Q_{со}$. При одинаковых начальных условиях, стоимость системы можно представить следующим образом:

$$Z_{со} = Z_{КТ} + Z_{тр.d} + Z_{ЦН} + Z_{НП} + Z_{а.d} + Z_{т.и}, \quad (8)$$

где $Z_{КТ}$, $Z_{тр.d}$, $Z_{ЦН}$, $Z_{НП}$, $Z_{а.d}$, $Z_{т.и}$ – стоимость соответственно водогрейного котла, труб, циркуляционного насоса, нагревательных приборов, запорно-регулирующей арматуры, тепловой изоляции у.е.

Стоимость элементов системы отопления для наиболее распространённых видов и марок оборудования предложено выразить следующими зависимостями [2]:

- водогрейные электрические котлы марки ZOTA и мощностью $N_{котл}$ (кВт):

$$Z_{КТ} = N_{котл} \cdot 78,191 \cdot (0,667 \cdot N_{котл} - 2)^{-0,423}, \quad (9)$$

- трубы лёгкие водогазопроводные (ГОСТ 3262-75):

$$Z_{тр.d} = l_{тр} \cdot 0,51 \cdot \exp(1,1 \cdot \ln d_y - 2,66), \quad (10)$$

где d_y – условный диаметр трубы, мм;

$l_{тр}$ – длина трубы, м;

- циркуляционные насосы однофазные марок (Grundfos, Wilo) для условий эксплуатации с к.п.д не ниже 75%:

$$Z_{ЦН} = 91,2 \cdot \exp[0,222 \cdot (H_p - 1,5)], \quad (11)$$

где H_p – номинальный (паспортный) напор насоса, м вод. ст.

- секционные алюминиевые нагревательные приборы:

$$Z_{НП} = n_{НП} \cdot n_{секц} \cdot c_{секц}, \quad (12)$$

где $n_{НП}$ и $n_{секц}$ – соответственно количество нагревательных приборов в системе и число секций в приборе, шт.;

$c_{\text{секц}}$ – стоимость одной секции прибора, у.е.

- запорно-регулирующая арматура (типа «шаровой муфтовый кран») марки Valtec:

$$Z_{a,d} = n_{\text{НП}} \cdot 6,29 \cdot \exp(2,1 \cdot \ln d_y - 5,3), \quad (13)$$

- тепловая изоляция из вспененного синтетического каучука:

$$Z_{\text{т.и.}} = l_{\text{из.}} \cdot 1,28 \cdot \exp(0,89 \cdot \ln d_y - 2,2), \quad (14)$$

где $l_{\text{из.}}$ – длина труб, покрытых тепловой изоляцией, м.

Потребление электрической энергии за расчётный период определяется мощностью системы отопления $Q_{\text{со}}$, продолжительностью отопительного периода $Z_{\text{оп}}$ и параметрами климата и эквивалентна расчётному теплотреблению $W_{\text{со}}$.

Теплотребление системы отопления (Вт·ч) за период работы $Z_{\text{оп}}$ (час) определяется с учётом изменяющейся температуры наружного воздуха и теплопоступлений от солнечной радиации [3]:

$$W_{\text{со}} = Q_{\text{со}} \cdot k_t \cdot Z_{\text{оп}} - \varphi \cdot W_{\text{рад,z}}, \quad (15)$$

где $k_t = (t_{\text{в}} - t_{\text{оп}})/(t_{\text{в}} - t_{\text{н}})^{-1}$ – температурный коэффициент;

$t_{\text{н}}$ и $t_{\text{оп}}$ – температура наружного воздуха соответственно расчётная для отопления и средняя за отопительный период, °С;

$t_{\text{в}}$ – температура внутреннего воздуха, °С;

$W_{\text{рад,z}}$ – теплопоступления в здание от солнечной радиации за отопительный период, Вт·ч;

φ – коэффициент снижения теплопоступлений за счет тепловой инерции ограждающих конструкций.

Теплопоступления от солнечной радиации определяются по всем светопропускающим ограждениям здания:

$$W_{\text{рад,z}} = 277,8 \cdot \tau_{1\text{ок}} \cdot \tau_{2\text{ок}} \cdot \sum_k \sum_i (I_{i,k}^{\text{вер}} \cdot A_{oi}), \quad (16)$$

где $\tau_{1\text{ок}}$ – коэффициенты относительного проникания солнечной радиации для светопропускающих заполнений;

$\tau_{2\text{ок}}$ – коэффициенты, учитывающие затенение светового проема непрозрачными элементами заполнения;

A_{oi} – площадь светопропускающих ограждающих конструкций внешней оболочки i -й ориентации, м²;

$I_{i,k}^{\text{вер}}$ – суммарная (прямая и рассеянная) за период $Z_{\text{оп}}$ величина солнечной радиации на вертикальную поверхность i -й ориентации при действительных условиях облачности в k -ом месяце расчётного периода, МДж/м² год.

Для здания, имеющего отапливаемый объём в форме параллелепипеда, расчётная тепловая мощность системы отопления может быть определена по выражению [4]:

$$Q_{\text{co}} = V \cdot \left(\frac{K_{\text{ст}}}{\left(\frac{V}{n_b \cdot n_h} \right)^{\frac{1}{3}}} \cdot \{ 2 \cdot (1 + n_b^{-1}) \cdot [1 + \bar{A}_o \cdot (K_o \cdot K_{\text{ст}}^{-1} - 1)] + K_{\text{ст}}^{-1} \cdot (0,9K_{\text{пт}} + 0,6K_{\text{пл}}) \cdot n_h^{-1} \} + 0,24 \right) \cdot (t_{\text{в}} - t_{\text{н}}). \quad (17)$$

По представленным уравнениям был проведён анализ условий существования оптимальных соотношений между различными энергосберегающими мероприятиями.

Анализ проводился для 2-х этажного индивидуального жилого здания, расположенного в климатических условиях Ангарска. Размер здания в плане – 12x8 м с высотой этажа 3 м. Отапливаемый объём составляет 576 м³. Конструкция наружных стен рассмотрена для двух вариантов:

- однослойная из газобетона ($\lambda = 0,14 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$);
- двухслойная с конструкционным материалом из газобетона толщиной 0,2 м и теплоизоляционного слоя из пеноплекса ($\lambda = 0,055 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$).

Конструкция остекления – двухкамерные стеклопакеты с сопротивлением теплопередачи $R_o = 1,23 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$. Коэффициент остекления вертикальных поверхностей – $\bar{A}_o = 0,25$. Сопротивления теплопередачи конструкций и элементов не подлежащих изменению приняты в размере нормативных значений [1]. Срок службы оболочки до капитального ремонта – 50 лет.

Система отопления водяная двухтрубная с нижней разводкой трубопроводов и автономным электрическим водогрейным котлом. Нагревательные приборы – алюминиевые секционные радиаторы. Срок службы инженерного оборудования в соответствии с гарантиями изготовителей:

- 10 лет для теплогенератора и циркуляционного насоса;
- 50 лет для остальных элементов системы отопления.

На рисунке 1 приведён график изменения единовременных затрат на основную часть оболочки здания (наружных стен) и системы отопления. Из полученных данных следует, что единовременные затраты существенно зависят от степени утепления оболочки. И если трёхкратное увеличение сопротивления теплопередаче стены уменьшает стоимость системы отопления на 40 %, то это увеличивает вложения в стены соответственно на 56 % для двухслойной и 64 % для однослойной конструкции. Если принимать в качестве приоритетного показателя капитальные затраты, то очевидно, что нет особой выгоды в чрезмерном утеплении стен (не более 1,5 от минимально допустимого значения сопротивления теплопередаче), так как это не ведёт к экономии суммарных затрат на оболочку и систему отопления. Усложнение конструкции стены за счёт введения утеплителя оказывается выгоднее однослойной стены, с повышением уровня утепления.

Эксплуатационные затраты сводятся к оплате на выработку тепловой энергии водогрейным котлом и функционированием системы отопления. На рисунке 2 представлены зависимости приведённых затрат на систему отопления и

здания от степени утепления двухслойной конструкции стены для различных тарифов на электроэнергию.

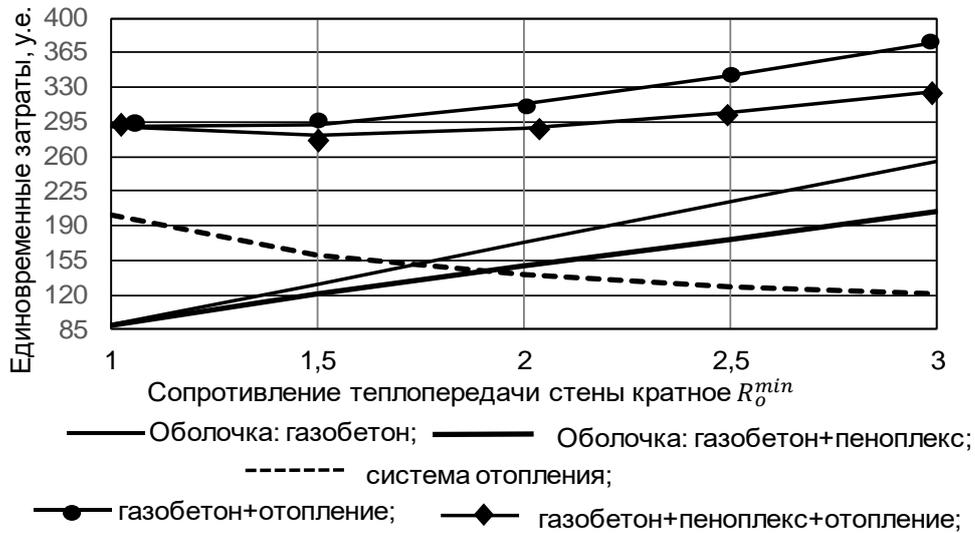


Рисунок 1 – Изменение единовременных затрат от утепления оболочки

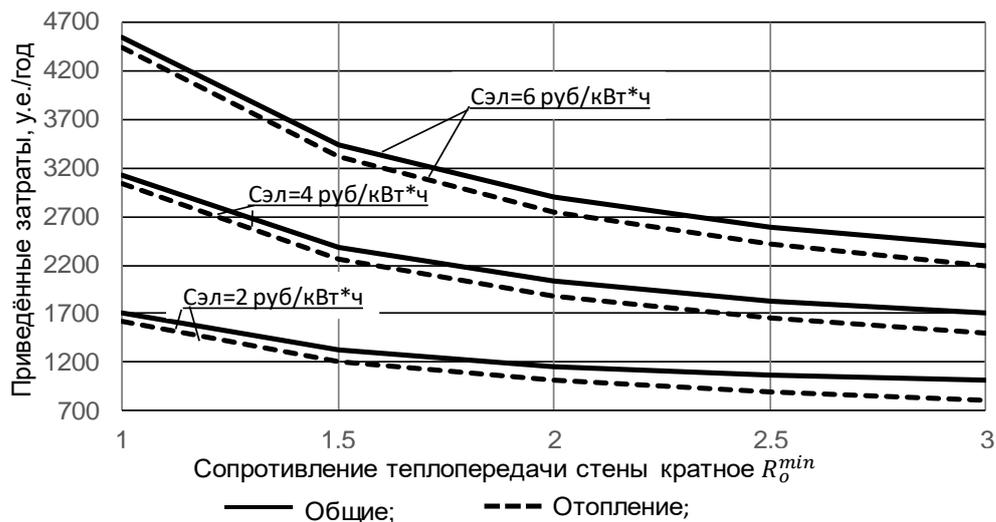
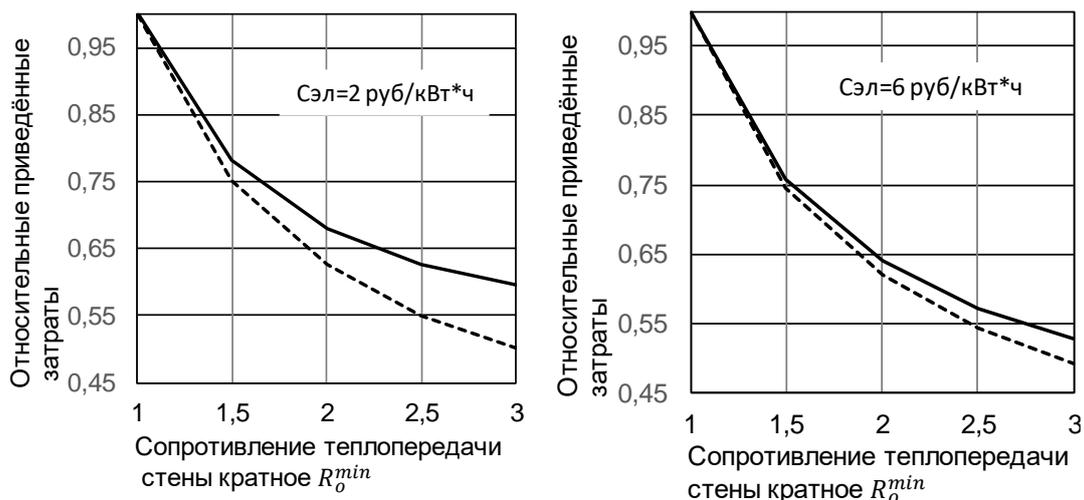


Рисунок 2 – Изменение приведённых затрат от утепления оболочки

Из графиков следует, что утепление наружной стены ведёт к устойчивому снижению приведённых затрат как на эксплуатацию системы отопления, так и здания в целом. Определяющий вклад на общие затраты вносит именно эксплуатационные затраты на отопление здания. Поэтому представляется малозначимым фактором единовременные затраты при назначении параметра оптимизации конструкции оболочки здания.

Динамику изменения приведённых затрат от утепления оболочки по отдельным составляющим можно оценить по отношению к соответствующим затратам при минимальном утеплении стен. На рисунке 3 приведены относительные приведённые затраты для системы отопления \bar{Z}_{CO} и общие \bar{Z}_O .



— общие; - - - - - на отопление;

Рисунок 3 – Изменение относительных приведённых затрат от утепления оболочки

Увеличение сопротивления теплопередаче в 3 раза уменьшает приведённые затраты на отопление в половину при любом тарифе на электроэнергию и темп падения затрат более интенсивный, чем общий на здание.

Приведённые результаты анализа влияния конструктивных и технологических показателей здания на их экономическую выгодность показывают, что несмотря на значительные первоначальные затраты на утепление оболочки здания, это мероприятия является наиболее эффективным на долгосрочную перспективу эксплуатации объекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Российская Федерация. Законы.** №261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности»
2. **Российская Федерация. Стандарты.** СП 50.133330.2012. Тепловая защита зданий.
3. **Кузьмин С.И.** Анализ влияния расчетной разности температуры теплоносителя на стоимость системы отопления индивидуального жилого здания /С. И. Кузьмин, А. В. Затева. //Сборник докладов международной научно-практической конференции «Инвестиции. Строительство. Недвижимость. Новые технологии и целевые приоритеты развития» (ICRE-2020) – С. 244-248.
4. **Кузьмин С.И.** Анализ влияния параметров здания на теплопотребление/ С.И. Кузьмин //Сборник АНГТУ. – 2019. – С. 116-122.