

EDN: IXBHRM

УДК 699.865

Improvement of Technology of Thermal Insulation of Buildings

Pavel V. Petrov^{*b}, Vladimir A. Kulagin^b,
Evgeny M. Rezanov^a and Alexander P. Starikov^a

^a*Omsk State Transport University
Omsk, Russian Federation*

^b*Siberian Federal University
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 16.01.2023, received in revised form 03.02.2023, accepted 12.03.2023

Abstract. The relevance of research is due to the fact that at present, modern standards for saving thermal energy and thermal protection of buildings are focused on the use of a very limited set of solutions to reduce energy consumption, which do not always meet the specific conditions of construction and are often very expensive. A technique for studying the effective insulation of building envelopes is proposed, taking into account the relationship between structural, heat engineering, regime parameters and economic indicators. The goal is to determine the optimal value of the thickness of insulation by the heat-insulating material of the object, taking into account the thermal energy supplied to it. In the study, methods of mathematical modeling of heat transfer, an optimization problem were used. An experimental study is presented, showing the possibility of applying the technique of technical and economic optimization of thermal insulation of building envelopes. The result of the study is to reduce the cost of heat losses through building envelopes and electrical energy for the regulation of the “heating, ventilation and air conditioning” system. The conducted studies testify to the expediency of using the proposed developments, which contribute to determining the optimal thickness of insulation with heat-insulating material of the walls of objects, finding the minimum reduced costs, and an advantageous choice of a method for regulating the supplied thermal energy.

Keywords: research, efficiency, costs, thermal energy, enclosing structures, optimal thickness.

Citation: Petrov, P.V., Kulagin, V.A., Rezanov, E.M., Starikov, A.P. Improvement of technology of thermal insulation of buildings. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2023, 16(2), 187–197. EDN: IXBHRM



Совершенствование технологии теплоизоляции зданий

П. В. Петров^б, В. А. Кулагин^б,
Е. М. Резанов^а, А. П. Стариков^а

*^аОмский государственный университет путей сообщения
Российская Федерация, Омск*

*^бСибирский федеральный университет
Российская Федерация, Красноярск*

Аннотация. Актуальность исследований обусловлена тем, что в настоящее время современные нормы сбережения тепловой энергии и теплозащиты зданий ориентированы на применение весьма ограниченного набора решений по снижению энергетического потребления, не всегда отвечающих конкретным условиям строительства и зачастую весьма дорогостоящих. Предложена методика исследования эффективного утепления ограждающих конструкций стен зданий, учитывающая взаимосвязь конструктивных, теплотехнических, режимных параметров и экономических показателей. Целью является определение оптимального значения толщины утепления теплоизоляционным материалом объекта с учетом отпускаемой ему тепловой энергии. В проведенном исследовании использовались методы математического моделирования теплообмена, оптимизационной задачи. Представлено экспериментальное исследование, показывающее возможность применения методики технико-экономической оптимизации тепловой изоляции ограждающих конструкций стен здания. Результатом исследования является снижение расходов тепловых потерь через ограждающие конструкции и электрической энергии на регулирование системы «отопление, вентиляция и кондиционирование». Проведенные исследования свидетельствуют о целесообразности использования предложенных разработок, способствующих определению оптимальной толщины утепления теплоизоляционным материалом стен объектов, нахождению минимальных приведенных затрат, выгодному выбору способа регулирования отпускаемой тепловой энергии.

Ключевые слова: исследование, эффективность, затраты, тепловая энергия, ограждающие конструкции, оптимальная толщина.

Цитирование: Петров П. В. Совершенствование технологии теплоизоляции зданий / П. В. Петров, В. А. Кулагин, Е. М. Резанов, А. П. Стариков. Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2023, 16(2). С. 187–197. EDN: IXBHRM

Введение

Поставленная цель исследования – сбережение энергетических ресурсов и материальных затрат – в настоящее время является основным направлением, так как соответствует современным тенденциям по сокращению затрат энергоресурсов в различных сферах народного хозяйства в России и отвечает Федеральному закону № 261 «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности ...» [1].

В настоящее время вопросы об энергоэффективности и энергосбережения зданий начали решать за счет использования широкого спектра теплоизоляционных материалов, которые с каждым годом пополняются новыми видами. При выборе капитальных и эксплуатационных расходов в системах теплоснабжения объектов наиболее выгоден с точки зрения технико-экономической оценки выбор оптимального варианта, характеризуемого наименьшими затратами труда [2]. Поэтому актуальным вопросом становится тема совершенствования техноло-

гии определения утепления зданий теплоизоляционным материалом за счет теплотехнических параметров утепления ограждающих конструкций зданий, учитывающих взаимосвязь с процессами регулирования энергетических ресурсов, затрачиваемых на систему «отопление, вентиляция и кондиционирование».

Одной из задач, поставленной РФ в сфере энергосбережения, является проблема сбережения энергетических ресурсов (тепловой и электрической энергии) в эксплуатируемых зданиях.

Основная задача – разработка эффективной методики расчета утепления стен зданий, способствующей определению минимальных капиталовложений и эксплуатационных расходов, с учетом регулирования отпускаемой тепловой энергии. Возможность решения данной задачи позволит уменьшить затраты на энергетические ресурсы.

Стоит уделить внимание на новые инновационные теплоизоляционные материалы и вопросу утепления. Одним из наиболее эффективных путей экономии энергии является сокращение потерь тепла через ограждающие конструкции зданий и сооружений при применении новых конструкций и технологий, например, широко используемых сейчас систем навесного вентилируемого фасада.

Теплоизоляционные материалы имеют как достоинства, так и недостатки. Ниже рассмотрим подробнее характеристики часто применяемых материалов.

1. Пенополиуретан:

Пенообразное жидкое вещество, которое наносится на конструкции зданий методом напыления. Это смесь воды, полиэфира, эмульгаторов, диизоцианата. В смесь добавляются катализаторы, возникает химическая реакция, и получается пенополиуретан. Коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,028$ (Вт/м·К). Достоинства: легкий, повышает прочность стен, устойчив к изменениям температурного режима, не требуются крепежи. Недостатки: неустойчив к ультрафиолетовому излучению, повышенная горючесть. Востребован при работе с большими объёмами, в частном строительстве используется редко.

2. Пенополистирол

Легкий газонаполненный продукт, получаемый из полистирола и его сополимеров. Достоинства: материал не поглощает влагу, небольшой вес, низкая стоимость. Коэффициенты теплопроводности $\lambda = 0,031–0,035$ (Вт/м·К). Недостатки: низкий уровень звукоизоляции, высокая горючесть, низкая паропроницаемость. На сегодняшний день этот материал самый бюджетный из всех качественных теплоизоляционных материалов, широко применяется в строительстве.

3. Эковата

Изготавливается из отходов бумаги и картона. Чаще всего применяется для утепления венцов в деревянном строительстве. Коэффициенты теплопроводности $\lambda = 0,037–0,042$ (Вт/м·К). Достоинства: высокий уровень звукоизоляции, небольшой расход материалов при утеплении, доступная стоимость, экологичность. Недостатки: маленький срок эксплуатации, высокий коэффициент водопоглощения.

4. Минеральная (шлаковая) вата

Сырьем для производства служат шлаки, известняк, доломит и прочие. Связующим является или карбамид, или фенол. Достоинства: негорючесть, прочность, высокая звукоизоляция, простота при монтаже. Коэффициенты теплопроводности $\lambda = 0,046–0,048$ (Вт/м·К). Недостатки:

потеря теплоизоляционных качеств при намокании, при пожаре идет интенсивное выделение токсичных материалов.

5. Стекловата

Для получения стеклянного волокна используют то же сырьё, что и для производства обычного стекла или отходы стекольной промышленности. Достоинства: влагоустойчивость, пожаробезопасность, невысокая цена, нетоксичен, удобен при транспортировке. Коэффициенты теплопроводности $\lambda=0,030-0,052$ (Вт/м·К). Недостатки: короткий срок эксплуатации, повышенная ломкость волокон.

6. Базальтовая вата

Для его получения используется щебень из природного базальта. Достоинства: негорючесть, прочность, высокая тепло- и звукоизоляция, высокая стойкость к органическим веществам, широкий диапазон температурного применения. Коэффициенты теплопроводности $\lambda=0,032-0,037$ (Вт/м·К). Недостатки почти отсутствуют.

7. PIR-утеплитель – это современный теплоизоляционный материал, обладающий одним из самых низких коэффициентов теплопроводности $\lambda=0,021$ (Вт/м·К). Материал практически не впитывает влагу, не гниёт, не подвержен биопоражениям и сохраняет свои теплоизоляционные свойства на протяжении всего срока службы – более 50 лет. Одним из достоинств PIR является то, что его можно отнести к классу отражательной теплоизоляции. Плюс ко всему он не поддерживает горение, что тоже немаловажно. Недостатки почти отсутствуют.

Значение оптимальной толщины утепления тепловой изоляцией с учетом регулирования отпускаемой тепловой энергии (рис. 1) можно найти исходя из минимума суммарных приведенных дисконтированных затрат на ограждающие конструкции стен здания $I_{ст}$ (р./год) при приравнивании к нулю частных зависимых от $\delta_{ут}$ производных функции по оптимизируемому параметру [3]:

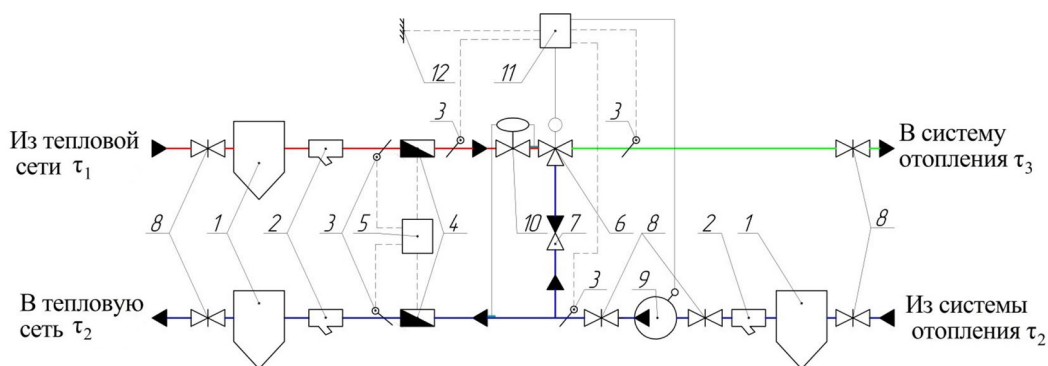


Рис. 1. Принципиальная схема узла регулирования отпускаемой тепловой энергии системы «отопление, вентиляция и кондиционирование» здания: 1 – грязевик; 2 – фильтр; 3 – датчик температуры; 4 – расходомер; 5 – тепловой вычислитель; 6 – трехходовой регулирующий клапан; 7 – обратный клапан; 8 – отключающая арматура; 9 – насос; 10 – регулятор перепада давления; 11 – регулятор по температурам; 12 – датчик температуры наружного воздуха

Fig. 1. Schematic diagram of the control unit of the released thermal energy of the «heating, ventilation and air conditioning» system of the building: 1 – mud collector; 2 – filter; 3 – temperature sensor; 4 – flow meter; 5 – thermal calculator; 6 – three-way control valve; 7 – check valve; 8 – disconnecting fittings; 9 – pump; 10 – differential pressure regulator; 11 – temperature controller; 12 – outdoor air temperature sensor

$$\frac{d\Pi_{\text{ст}}}{d\delta_{\text{yt}}} = (86400z_{\text{от}}\Pi_{\text{т}} + b) \frac{dQ_{\text{ст}}}{d\delta_{\text{yt}}} + (E_{\text{ст}} + H) \frac{dK_{\text{ст}}}{d\delta_{\text{yt}}} = 0, \quad (1)$$

где δ_{yt} – толщина утепляющего слоя теплоизоляционного материала ограждающей конструкции стен здания, м; $z_{\text{от}}$ – продолжительность отопительного периода, сут/год; $\Pi_{\text{т}}$ – средняя годовая стоимость тепловой энергии, р./Дж; b – комплекс величин, учитывающий регулирование отпускаемой тепловой энергии; $Q_{\text{ст}}$ – тепловые потери через наружные стены, Вт; $E_{\text{ст}}$ – коэффициент эффективности инвестиций в утепление тепловой изоляцией ограждающих конструкций стен здания, 1/год; H – норма отчислений в относительных единицах на амортизацию и ежегодное обслуживание системы теплового потребления здания, 1/год; $K_{\text{ст}}$ – капиталовложение в сберегающие мероприятия по утеплению тепловой изоляцией ограждающих конструкций стен здания, р.

Решение уравнения (1) можно представить в виде:

$$\delta_{\text{yt}}^{\text{опт}} = -R_{\text{уст}}\lambda_{\text{yt}} + \sqrt{\frac{(86400z_{\text{от}}\Pi_{\text{т}} + b)\lambda_{\text{yt}}(\sum F_{\text{ст},i}(t_{\text{в},i} - t_{\text{от}})n_i)}{r_0\eta(E_{\text{ст}} + H)\Pi_{\text{yt}}F_{\text{ст}}}}, \quad (2)$$

$$b = \frac{\Pi_{\text{н}}^{\text{эл}}kH_{\text{н}}\gamma Z_{\text{н}}N_{\text{н}}^{\text{раб}}}{\rho_{\text{в}}C_{\text{в}}(\tau_3 - \tau_2)\eta_{\text{н}}\eta_{\text{п}}}, \quad (3)$$

$$\tau_1 = t_{\text{в}} + \Delta t \bar{Q}_0^{0,8} + (\delta \tau - 0,5\Theta) \frac{\bar{Q}_0}{G_0}, \quad (4)$$

$$\tau_2 = t_{\text{в}} + \Delta t \bar{Q}_0^{0,8} - 0,5\Theta \frac{\bar{Q}_0}{G_0}, \quad (5)$$

$$\tau_3 = t_{\text{в}} + \Delta t \bar{Q}_0^{0,8} + 0,5\Theta \frac{\bar{Q}_0}{G_0}, \quad (6)$$

$$\bar{Q}_0 = \left(\frac{t_{\text{в}} - t_{\text{от}}}{t_{\text{в}} - t_{\text{нх}}} \right), \quad (7)$$

где $\delta_{\text{yt}}^{\text{опт}}$ – оптимальная толщина утепляющего слоя теплоизоляционного материала стен здания, м; $R_{\text{уст}}$ – установленное сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции стен здания, (м²·°С)/Вт; λ_{yt} – теплопроводность утепляющего слоя теплоизоляционного материала ограждающей конструкции стен здания, Вт/(м·°С); $F_{\text{ст},i}$ – площадь поверхности наружных ограждающих конструкций стен здания i -ой зоны помещения, м²; $t_{\text{в},i}$ – средняя температура внутреннего воздуха i -ой зоны помещения здания, °С; n_i – коэффициент, зависящей от положения i -от зоны наружной поверхности ограждающей конструкции стен здания по отношению к наружному воздуху; $t_{\text{от}}$ – среднесуточная температура наружного воздуха за отопительный период, °С; r_0 – коэффициент теплотехнической однородности ограждающей конструкции; η – коэффициент расхождения усреднённости по площади условного сопротивления теплопередаче стен здания, при утеплении его снаружи теплоизоляционным материалом; Π_{yt} – стоимость 1 м³ утепляющего теплоизоляционного материала, р./м³; $F_{\text{ст}}$ – общая площадь поверхности наружных ограждающих конструкций стен здания после утепления его тепловой изоляцией, м²; $\Pi_{\text{н}}^{\text{эл}}$ – средняя годовая стоимость электрической энергии потребления перекачивающим насосом, р./(Вт·ч); $Z_{\text{н}}$ – продолжительность работы насоса в течение суток, ч; $N_{\text{н}}^{\text{раб}}$ – число рабочих

дней в году насосного оборудования, 1/год; k – коэффициент запаса; H_n – напор, развиваемый насосом, м; γ – удельный вес перекачиваемой жидкости, Н/м³; $\eta_{п}$ – коэффициент полезного действия передачи; η_p – коэффициент полезного действия насоса; ρ_v – плотность перекачиваемой жидкости, кг/м³; C_v – теплоемкость перекачиваемой жидкости, Дж/кг·°С; τ_1 – текущая температура жидкости в подающем трубопроводе тепловой сети, °С; τ_3 – текущая температура перекачиваемой жидкости в подающем трубопроводе системы «отопление, вентиляция и кондиционирование», °С; τ_2 – текущая температура перекачиваемой жидкости в обратном трубопроводе системы «отопление, вентиляция и кондиционирование», °С; t_v – средняя расчетная температура внутреннего воздуха помещений здания, °С; Δt – расчетный температурный напор в нагревательных приборах отопительной системы, °С; \bar{Q}_0 – относительная нагрузка системы «отопление, вентиляция и кондиционирование»; $t_{нх}$ – температура наружного воздуха в наиболее холодный период года, °С; δt – расчетный температурный перепад в сети, °С; Θ – расчетный температурный перепад в отопительной системе, °С; \bar{G}_0 – относительный расход воды на систему «отопление, вентиляция и кондиционирование»:

при качественном регулировании $\bar{G}_0 = 1$,

при количественном регулировании

$$\bar{G}_0 = \frac{\bar{Q}_0}{1 + \frac{\Delta t}{\delta t - 0,5 \cdot \Theta} \cdot (1 - \bar{Q}_0^{0,8})}, \quad (8)$$

– при качественно-количественном регулировании

$$\bar{G}_0 = \bar{Q}_0^{0,33}. \quad (9)$$

На основании уравнений (1)–(9), свода правил «Тепловая защита зданий» [4] и методики [5] разработано программное обеспечение «Определение оптимальной толщины утепления тепловой изоляцией ограждающих конструкций стен здания» [6].

Расход отпускаемой тепловой энергии зданию на систему «отопление, вентиляция и кондиционирование» $Q_{от}$ (Вт) можно записать из баланса теплового потребления [4–8] в виде:

$$Q_{от} = G_v \cdot \rho_v \cdot C_v \cdot (\tau_3 - \tau_2) = Q_{ст} + Q_{ч} + Q_{ок} + Q_{дв} + Q_{пол} + Q_{инф} + Q_{тс} - Q_s - Q_{т}, \quad (10)$$

где G_v – расход перекачиваемой жидкости в системе «отопление, вентиляция и кондиционирование», м³/с; $Q_{ч}$ – тепловые потери через чердачные перекрытия (покрытия), Вт; $Q_{ок}$ – тепловые потери через светопрозрачные конструкции (оконные блоки, зенитные фонари и витражи), Вт; $Q_{дв}$ – тепловые потери через наружные двери и ворота, Вт; $Q_{пол}$ – тепловые потери через пол, Вт; $Q_{инф}$ – тепловые потери за счет инфильтрации и вентиляции, Вт; $Q_{тс}$ – тепловые потери трубопроводной системой «отопление, вентиляция и кондиционирование», проходящей через неотапливаемые помещения, Вт; Q_s – тепловые поступления от солнечной радиации, Вт; $Q_{т}$ – бытовые тепловыделения в здании, Вт.

Годовой расход электрической энергии на привод насосного оборудования при регулировании отпускаемой тепловой энергии \mathcal{E}_n (Вт·ч/год) [8]:

$$\mathcal{E}_n = Z_n \cdot N_n^{раб} \cdot P_n, \quad (11)$$

где P_n – средняя мощность работы насосного оборудования, Вт:

$$P_n = \frac{k \cdot Q_{от} \cdot H_n \cdot \gamma}{\rho_b \cdot C_b \cdot (\tau_3 - \tau_2) \cdot \eta_n \cdot \eta_p} \quad (12)$$

Проведение численных исследований и анализа предложенных разработок в проектируемом объекте «Поликлиника ГБ № 3 по адресу: Новосибирская область, г. Новосибирск, ул. Мухачева, 5/1».

Первый вариант – наружные стены толщиной 510 мм с вентилируемым фасадом и утеплением минераловатными плитами Техноколь ТЕХНОВЕНТ СТАНДАРТ толщиной 120 мм.

Второй вариант – наружные стены толщиной 510 мм с вентилируемым фасадом и утеплением теплоизоляционной PIR-плитой Piro Термо толщиной 70 мм.

Выражение для капитальных вложений в теплосберегающие мероприятия по утеплению тепловой изоляцией ограждающих конструкций стен зданий можно представить в виде, р.:

$$K_{ст} = C_{ут} \cdot \delta_{ут} \cdot F_{ст} + C_{раб} \cdot F_{ст}, \quad (13)$$

где $C_{ут}$ – стоимость 1 м³ утепляющего теплоизоляционного материала, р./м³; $F_{ст}$ – общая площадь поверхности наружных ограждающих конструкций стен здания после утепления его тепловой изоляцией, м²; $C_{раб}$ – стоимость 1 м² работ по утеплению ограждающих конструкций стен здания теплоизоляционным материалом с учетом прочих расходов (стоимость трудозатрат, креплений и т.д.), р./м²; $\delta_{ут}$ – толщина утепляющего слоя теплоизоляционного материала ограждающей конструкции стен здания, м;

Таблица 1. Фактическое значение приведенного сопротивления теплопередаче наружной стены выше отм. 0.000

Table 1. The actual value of the reduced heat transfer resistance of the outer wall is above approx. 0.000

Наименование	λ_s , Вт/м·°C	δ_s , мм	$R_{s, m^2 \cdot ^\circ C / Вт}$
Техноколь ТЕХНОВЕНТ СТАНДАРТ	0.038	120	3,421
Кирпичная кладка из глиняного обыкновенного на цементно-песчаном растворе кирпича, 1800 кг/м ³	0,7	510	0,729
Цементно-песчаный р-р, 1800 кг/м ³	0,76	20	0,026
			$R_s = 4,176$

Таблица 2. Фактическое значение приведенного сопротивления теплопередаче наружной стены выше отм. 0.000

Table 2. The actual value of the reduced heat transfer resistance of the outer wall is above approx. 0.000

Наименование	λ_s , Вт/м·°C	δ_s , мм	$R_{s, m^2 \cdot ^\circ C / Вт}$
PIR-плита Piro Термо	0.021	70	3,33
Кирпичная кладка из глиняного обыкновенного на цементно-песчаном растворе кирпича, 1800 кг/м ³	0,7	510	0,729
Цементно-песчаный р-р, 1800 кг/м ³	0,76	20	0,026
			$R_s = 4,085$

Для подключения систем вентиляции и отопления в проекте предусмотрен блочный ИТП с теплообменником (заводского изготовления). ИТП состоит из блока ввода ТС, блока отопления и вентиляции, блока ГВС.

Параметры теплоносителя (вода):

- на входе в теплообменник: $T_1=130$ °С, $T_2=70$ °С, $P_1=4,8$ кгс/см², $P_2=2,4$ кгс/см²;
- на выходе из теплообменника в систему вентиляции $T_1=130$ °С, $T_2=70$ °С; в систему отопления $T_1=85$ °С, $T_2=70$ °С; в систему ГВС: $T_3=65$ °С, $T_4=5$ °С.

Система отопления помещений принята двухтрубная, тупиковая.

В качестве отопительных приборов приняты радиаторы стальные трубчатые типа РСК.

Отвод воздуха от радиаторов осуществляется воздуховыпускными кранами Маевского, расположенными на каждом радиаторе, и автоматическими воздухоотводчиками, расположенными в высших точках трубопроводов систем отопления и теплоснабжения.

Для сброса воды из систем отопления и теплоснабжения предусмотрены краны в нижних точках магистралей.

Для регулирования теплоотдачи радиаторов применяются терморегуляторы.

Для балансировки, отключения, спуска воды установлены балансировочные клапаны. Магистральные трубопроводы прокладываются по техподполью.

Магистральные трубопроводы, стояки, подводки к приборам системы отопления приняты из сшитого полиэтилена по ГОСТ 32415–2013, для системы теплоснабжения приточных установок трубопроводы приняты по ГОСТ 1074–91.

Наружные стены по проекту: выше отметки 0.000 – кирпичная кладка из полнотелого кирпича, толщиной 510 мм с коэффициентом теплопроводности 0,7 Вт/(м·°С), также с вентилируемым фасадом и утеплением минераловатными плитами Технониколь ТЕХНОВЕНТ СТАНДАРТ толщиной 120 мм. с коэффициентом теплопроводности 0,038 Вт/(м·°С); ветрозащитная мембрана – 0,0015 м, 0,4 Вт/(м·°С).

Численные исследования влияния изменения толщины теплоизоляционных сэндвич-панелей из минеральных плит на основе базальтового волокна с коэффициентом теплопроводности 0,038 Вт/(м·°С) и стоимостью 5090 р./м³ на технико-экономическую эффективность показали уменьшение затрат $I_{ст}$ при качественном регулировании отпускаемой тепловой энергии с оптимальной толщиной 0,036 м (рис. 2).

Результаты численного исследования (рис. 2) подтверждают рациональность применения технико-экономической оптимизации утепления стен здания: получен минимум приведенных затрат при снижении расхода тепловых потерь через ограждающие конструкции, потребления тепловой и электрической энергии на систему «отопление, вентиляция». Рекомендации были приняты в проектируемом объекте исследования «Поликлиника ГБ № 3 по адресу: Новосибирская область, г. Новосибирск, ул. Мухачева, 5/1».

Проведенные исследования свидетельствуют о целесообразности использования предложенных разработок, способствующих определению оптимальной толщины утепления теплоизоляционным материалом стен объектов, нахождению минимальных приведенных затрат, выгодному выбору способа регулирования отпускаемой тепловой энергии, и направлены на повышение класса энергоэффективности зданий.

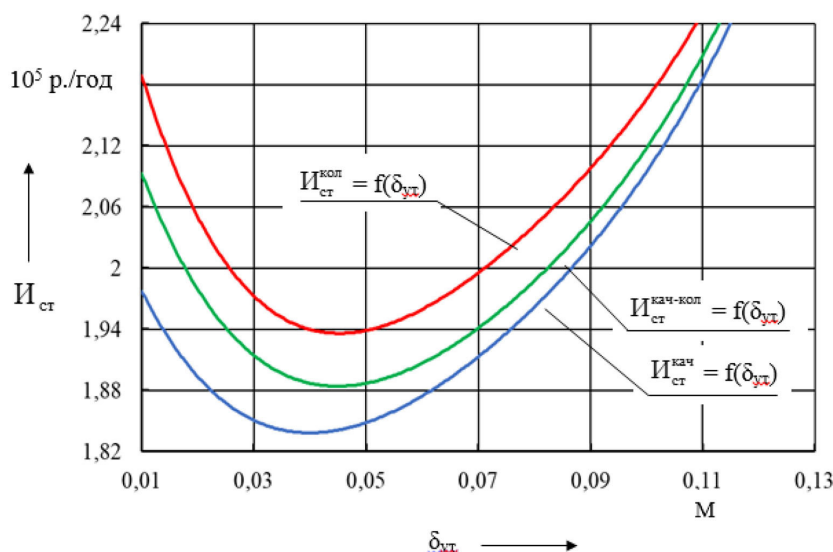


Рис. 2. Зависимости $I_{ст}^{кач}$, $I_{ст}^{кач-кол}$ и $I_{ст}^{кол}$ от $\delta_{ут}$. $I_{ст}^{кач}$ – затраты по утеплению наружных ограждающих конструкций стен здания при качественном регулировании отпускаемой тепловой энергии, руб/год; $I_{ст}^{кач-кол}$ – затраты по утеплению наружных ограждающих конструкций стен здания при качественно-количественном регулировании отпускаемой тепловой энергии, руб/год; $I_{ст}^{кол}$ – затраты по утеплению наружных ограждающих конструкций стен при количественном регулировании отпускаемой тепловой энергии, руб/год

Fig. 2. Dependencies $I_{ст}^{кач}$, $I_{ст}^{кач-кол}$ и $I_{ст}^{кол}$ от $\delta_{ут}$. $I_{ст}^{кач}$ – costs of thermal insulation of the outer enclosing structures of the walls of the building with a high-quality regulation of the supplied thermal energy, rub/year; $I_{ст}^{кач-кол}$ – costs for the insulation of the outer enclosing structures of the walls of the building with the qualitative and quantitative regulation of the supplied thermal energy, rub/year; $I_{ст}^{кол}$ – costs of thermal insulation of external enclosing structures of walls in case of quantitative regulation of supplied thermal energy, rub/year

Список литературы / References

[1] Федеральный закон от 23.11.2009 № 261-ФЗ (ред. от 27.12.2018) «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_93978/ [Federal law of 23.11.2009 № 261-FZ (ed. From 27.12.2018) “On energy saving and energy efficiency enhancement and on amendments to certain legislative acts of the Russian Federation” Access: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_93978/].

[2] Ведрученко В. Р., Петров П. В. и др. Оптимизация затрат при проектировании и эксплуатации тепловых схем и систем теплоснабжения потребителей. *Промышленная теплоэнергетика*. 2013, 2(143), 23–27 [Vedruchenko V. R., Petrov P. V. et al. Cost optimization in the design and operation of thermal circuits and heat supply systems for consumers. *Industrial heat power engineering* 2013, 2(143), 23–27 (in Rus.)].

[3] Ведрученко В. Р., Резанов Е. М. и др. Определение оптимальной толщины тепловой изоляции ограждающих конструкций зданий при капитальном ремонте, *Омский научный вестник*. 2015, 3(143), 254–258 [Vedruchenko V. R., Rezanov E. M. et al. Determination of the optimum thickness of the thermal insulation of the building envelope during overhaul, *Omsk Scientific Bulletin*, 2015, 3(143), 254–258 (in Rus.)].

[4] СП 50.13330.2012. *Тепловая защита зданий* [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200095525> [*Thermal protection of buildings*, SP 50.13330.2012] [Electronic resource] – Access: <http://docs.cntd.ru/document/1200095525>.

[5] Резанов Е. М., Петров П. В. и др. Методика эффективного расчета утепления наружных ограждающих конструкций стен зданий при проведении капитального ремонта, *Омский научный вестник*. Омск., 2016, 6(150), 109–113. [Rezanov E. M., Petrov P. V. et al. Methodology for the effective calculation of insulation of external walling of buildings during major repairs, *Omsk Scientific Bulletin*, 2016, 6(150), 109–113 (in Rus.).]

[6] Свидет. о гос. рег. программы для ЭВМ № 2016616691 Российская Федерация. *Определение оптимальной толщины утепления тепловой изоляцией ограждающих конструкций стен здания*, заявитель и патентообладатель П. В. Петров.– № 2016614064, опублик. 20.07.2016. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www1.fips.ru/Archive/EVM/2016/2016.07.20/DOC/RUNW/000/002/016/616/691/DOCUMENT.PDF> [Petrov P. V. Svidet. o gos. reg. programmy` RU № 2016616691, 20.07.2016. Access: <https://www1.fips.ru/Archive/EVM/2016/2016.07.20/DOC/RUNW/000/002/016/616/691/DOCUMENT.PDF>]

[7] Шилкин Н. В. *Методы повышения тепловой эффективности зданий и их экономическая оценка*, дис... канд. техн. наук: 05.23.03. Москва, 2007. 174. [Shilkin, N. V. *Methods for increasing the thermal efficiency of buildings and their economic evaluation*, dis. ... cand. tech. science, Moscow, 2007. 174 (in Rus.).]

[8] Фролова А. А. *Выбор теплозащиты офисных зданий с учетом энергетических и экономических показателей систем климатизации*, дис... канд. техн. наук: 05.23.03, Москва, 2017, 147 [Frolova, A. A. *The choice of thermal protection for office buildings, taking into account the energy and economic indicators of air conditioning systems*, dis. ... cand. tech. science, Moscow, 2017, 174 (in Rus.).]

[9] Бобров Ю. Л. и др. *Теплоизоляционные материалы и конструкции*. М., Инфра-М, 2014. 282 [Bobrov Yu. L. etc. *Heat-insulating materials and constructions*, Moscow, Infra-M, 2014. 282 (in Rus.).]

[10] Шахин В. П. Энергоэффективность и энергосбережение в России: состояние, проблемы, пути решения. *Энергонадзор и энергоэффективность*. 2003, 10, 7–13. [Shakhin, V. P. Energy efficiency and energy saving in Russia: state, problems, solutions, *Energy supervision and energy efficiency*. 2003, 10, 7–13 (in Rus.).]

[11] Рубцов А. С. Куда уходит тепло? *ЭнергоНадзор*. 2010. 1(10). 40–43. [Rubtsov, A. S. Where does the heat go? *EnergoNadzor*. 2010. 1(10). 40–43 (in Rus.).]

[12] Горячев С. В. Панельные дома: куда уходит тепло? Метод тепловизионной диагностики зданий. *Стр-во и гор. хоз-во в Санкт-Петербурге и Ленингр. обл.* 2005. 76. 154–155. [Goryachev, S. V. Panel houses: where does the heat go? Method of thermal imaging diagnostics of buildings, *Str-vo and gor. khoz-vo in St. Petersburg and Leningr. region*. 2005. 76. 154–155. (in Rus.).]

[13] Ватин Н. И. и др. Влияние уровня тепловой защиты ограждающих конструкций на величину потерь тепловой энергии в здании. *Инженерно-строительный журнал*. 2012. 8. 4–14 [Vatin N. I. Influence of the level of thermal protection of enclosing structures on the value of thermal energy losses in a building, *Engineering and construction magazine*. 2012. 8. 4–14 (in Rus.).]

[14] Афанасьев А. А., Матвеев Е. П. *Реконструкция жилых зданий. Часть II. Технологии восстановления эксплуатационной надежности жилых зданий*. М., 2008. 479. [Afanasyev, A. A.,

Matveev, E.P. *Reconstruction of residential buildings. Part II. Technologies for restoring the operational reliability of residential buildings*. Moscow, 2008. 479. (in Rus.).

[15] Еремкин А.И., Королева Т.И. *Тепловой режим зданий*. М., АСВ, 2000. 368. [Eremkin, A.I. Koroleva, T.I. *Thermal regime of buildings*. М., DIA, 2000. 368. (in Rus.).]

[16] Сигачев Н.П. *Энергосбережение в зданиях с управляемыми тепло-воздухообменными режимами*, дис. ... д-ра техн. наук. Чита, 2001. 341. [Sigachev, N.P. *Energy saving in buildings with controlled heat and air exchange modes*, dis. ... doct. Tech. Sci. Chita, 2001. 341. (in Rus.).]

[17] Рубашкина Т.И. *Исследование эффективности современных утеплителей в многослойных ограждающих конструкциях зданий*, дис. ... канд. техн. наук. Чита, 2009. 152. [Rubashkina, T.I. *Investigation of the effectiveness of modern insulation in multilayer enclosing structures of buildings*, dis. ... cand. tech. Sciences. Chita, 2009. 152 (in Rus.).]