

К ПРОБЛЕМЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ ЗДАНИЙ

С.Е. Щеклеин, А.Г. Шастин

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина
Россия, 620002 Екатеринбург, ул. Мира, д. 19
Тел: (343) 375-9 5-08, e-mail: s.e.shcheklein@urfu.ru

Заключение совета рецензентов: 23.05.15 Заключение совета экспертов: 27.05.15 Принято к публикации: 31.05.15

В настоящей работе рассмотрены вопросы оптимизации тепловой защиты зданий для суровых климатических условий. Показана целесообразность учета качества (эксергетического потенциала) энергии, расходуемой на производство теплозащитных материалов, и энергии, потребляемой для целей отопления.

Ключевые слова: тепловая защита, энергия, эффективность, эксергия, диатомит.

ON THE PROBLEM OF THERMODYNAMIC OPTIMIZATION OF THERMAL PROTECTION OF BUILDINGS

S.E. Shcheklein, A.G. Shastin

Urals Federal University named after the first President of Russia Boris Yeltsin
19 Mira str., Ekaterinburg, 620002, Russia
Tel.: (343) 375-95-08, e-mail: s.e.shcheklein@urfu.ru

Referred: 23.05.15 Expertise: 27.05.15 Accepted: 31.05.15

This paper discusses the optimization of thermal protection of buildings to the harsh climatic conditions. The reasonableness of accounting quality (exergetic potential) energy consumed in the production of heat-shielding materials and energy consumed for heating purposes.

Keywords: thermal protection, energy efficiency, exergy, diatomite.



*Сергей Евгеньевич
Щеклеин
Sergey E. Shcheklein*

Сведения об авторе: д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Атомные станции и возобновляемые источники энергии» УрФУ.

Научный руководитель ряда реализованных инновационных проектов, в т. ч. «Энергоэффективный дом для села», «Системы солнечного энергоснабжения автономных потребителей специального назначения», «Солнечные системы охранной сигнализации» и др.

Член редколлегии журнала «Известия вузов. Ядерная энергетика», сборника трудов УГТУ-УПИ «Теплофизика ядерных энергетических установок», научно-технического журнала «Энергоэффективность и анализ». Заслуженный энергетик России, действительный член Международной энергетической академии.

Образование: Уральский политехнический институт (УГТУ-УПИ) (1972).

Область научных интересов: термодинамика ядерных энергетических установок, проблемы атомной энергетики и теплофизики двухфазных потоков, продление ресурса и повышение надежности оборудования АЭС, солнечная энергетика, ветровая энергетика, биоэнергетика, энергосбережение, энергоэффективность.

Публикации: более 450, в том числе 6 монографий и учебников, 28 изобретений.

Information about the author: doctor of technical science, professor, Urals State Technical University "Atomic Stations and Renewable Energy Sources" Department head.

A scientific director of several realized innovation projects, including "The energoefficient house for the village", "Special systems of individual consumer solar energy supply", "The solar systems for the guarding alarm" etc.

A member of the editorial board of "Institute of Higher Education News. Nuclear Power" magazine, "Nuclear power units heat engineering" USTU article collection, "Energoeffectiveness and analysis" scientific magazine. A Honoured power engineering specialist of Russian Federation, a member of International Energy Academy.

Education: Urals Polytechnic Institute (1972).

Research area: nuclear power units thermodynamics; questions of nuclear energy and thermophysics of the two-phase flows; NPP equipment lifetime enduring and reliability increasing; solar, wind and bioenergetics, energy conservation, energy efficiency.

Publications: more than 450 scientific works, including 6 monographs and textbooks, 28 inventions.



Арнольд Георгиевич
Шастин
Arnold G. Shastin

Сведения об авторе: канд. техн. наук, профессор кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии» УрФУ. Заслуженный энергетик РФ. Награжден орденами и медалями СССР.

Образование: Уральский политехнический институт (УГТУ-УПИ) (1961), Уральский гос. университет (1967).

Область научных интересов: атомная энергетика, нетрадиционные и возобновляемые источники энергии, техническое применение мощного ультразвука.

Публикации: более 100 научных трудов, 20 изобретений.

Information about the author: a candidate of technical science, professor, Urals State Technical University "Atomic Stations and Renewable Energy Sources" Department.

The distinguished engineer of Russian Federation. He was awarded orders and medals of the USSR.

Education: Urals Polytechnic Institute (1961), Ural State University (1967).

Research area: atomic energetics; non-traditional and renewable energy sources, technical application of powerful ultrasound.

Publications: more than 100 scientific works, 20 inventions.

Введение

Стремление построить энергоэффективное здание стимулируется желанием создания благоприятных для человека условий жизнедеятельности на фоне дефицитности и повышения стоимости энергетических ресурсов (страны ЕС) либо их значительных расходов в суровых климатических условиях (РФ), что также ведет к росту затрат на эксплуатацию зданий. Важным мотивом снижения энергозатрат является стремление обеспечить значительную долю энергопотребления здания за счет возобновляемых источников энергии. Однако отсутствие системного подхода при разработке мероприятий по снижению теплопотерь стенами зданий в жилищном секторе развитых стран привело к существенному противоречию между поставленными целями и полученными результатами – снижение теплопотерь на единицу энергии влечет за собой увеличение энергозатрат на производство тепловой изоляции [1]. Идея использовать количество энергии в качестве меры стоимости объекта была предложена еще в 1983 году В.И. Вернадским и получила развитие в работах ряда отечественных и зарубежных исследователей [2-7]. Особое значение при решении данной задачи приобретает качество энергии, используемой для производства строительных и теплоизоляционных материалов, с одной стороны, и целей теплоснабжения – с другой.

На рис. 1 приведена технологическая схема, применяемая при производстве минераловатных теплоизоляционных материалов [8].

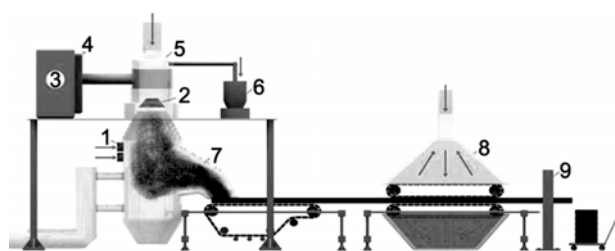


Рис. 1. Схема технологического модуля производства базальтоволоконной теплоизоляции:

1 – распылители связующего; 2 – дутьевая головка; 3 – генератор; 4 – блок нагрузочного контура; 5 – индукционная печь; 6 – дозатор; 7 – камера волокноосаждения; 8 – камера сушки; 9 – резак

Fig. 1. Scheme of technological module of production basalt fiber heat insulation:

1 – binder nebulizers; 2 – blowhead; 3 – generator; 4 – the block load circuit; 5 – induction furnace; 6 – doser; 7 – fiber deposition chamber; 8 – the drying chamber; 9 – cutter

В табл. 1 приведены некоторые технические параметры, характеризующие энергоемкость процесса производства теплоизоляции.

Таблица 1
Расход материальных и энергетических ресурсов
для производства 1 тонны теплоизоляции [8]

Table 1
Consumption of material and energy resources
for the production of 1 ton of heat insulation [8]

Ресурс	Количество
Базальтовое сырье, кг	1250
Электроэнергия, кВт·ч	3500
Сжатый воздух, м ³	12000
Техническая вода, м ³	260
Электроды, кг	25

Таблица 2
Расход энергетических ресурсов
для производства ряда строительных материалов

Table 2
Consumption of energy resources for
the production of a number of building materials

Материалы и конструкции	Общие энергозатраты, МДж
Цемент, т	7250
Кирпич глиняный, 1000 шт.	8903
Стекло листовое, т (1000 м ²)	90190
Керамзит гравийный, м ³	3538
Минеральная вата товарная, м ³	2320
Пенобетон, м ³	3451
Плитка керамическая облицовочная, 1000 м ²	368880
Трубы канализационные чугунные, т	28710
Трубы пластмассовые из поливинилхлорида, т	140331
Трубы стальные, т	55941
Гипсокартонные листы, 1000 м ²	54549
Железобетонные сборные стеновые конструкции из легкого бетона, м ³	9106
Бетонные сборные конструкции, м ³	5858
Железобетонные монолитные конструкции, м ³	7830

Другие материалы, применяемые в строительстве, также требуют для производства значительных затрат энергии, как правило, высокого потенциала. В табл. 2 приведены энергоемкости ряда стандартных материалов строительной индустрии по данным [9].

Постановка задачи

Оценить суммарные затраты на сооружение и эксплуатацию в течение длительного периода (50 лет) двухэтажного жилого здания общей площадью 200 кв.м при выполнении санитарно-гигиенических требований к жилым помещениям [10] с учетом потребности в тепловой энергии для целей отопления и вентиляции. В качестве модельных климатических условий использованы данные для зоны Среднего Урала [11]. Анализ выполнялся для нескольких видов строительных материалов и комбинированных вариантов конструкций стеновых материалов (кирпич, железобетон, пенобетон, полистиролбетон и кирпич + пенопласт, пенобетон + пенопласт) и производился по критериям отыскания минимальных значений суммарных затрат – **финансовых, энергетических и эксергетических**. Последний из данных критериев учитывает не только количество, но и качество используемой энергии. Эксергия – физическая величина, характеризующая способность системы совершать полезную работу, следовательно, отопление зданий, производимое средами с низкими энергетическими параметрами, значительно менее эксергоемко, чем процесс создания теплоизоляции и стеновых материалов, как правило, связанный с затратами электрической и высокопотенциальной тепловой энергии.

Методика исследований

Затраты энергии

Затраты энергии на создание строительных материалов и всего здания оцениваются по данным работ [1, 3-7]:

$$Q_{k\Sigma} = K_{\text{изг}} \sum_{i=1}^n \frac{m_i Q_{ki}}{K_{\text{им}}} \quad (1)$$

где $K_{\text{изг}}$ – поправочный коэффициент, учитывающий затраты энергии на изготовление деталей, сборку, транспортировку.

Затраты энергии на отопление и вентиляцию здания оцениваются по [12]:

$$Q_{\text{от}} = Q_{\text{тр}} + Q_{\text{в}} - Q_{\text{быт}}, \quad (2)$$

где $Q_{\text{тр}} = A(t_p - t_{\text{ext}})(1 + \Sigma\beta)n/R$, – трансмиссионные потери теплоты через ограждающие конструкции; A – расчетная площадь ограждающей конструкции, м²; R – сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции, м²·°C/Вт; β – добавочные потери теплоты в долях от основных потерь; t_p – расчетная температура воздуха, °C, в помещении; t_{exp} – расчетная температура наружного воздуха для холодного периода года при расчете потерь теплоты через наружные ограждения (со средней суточной температурой воздуха ниже или равной 8 °C).

Общие трансмиссионные потери теплоты равны сумме трансмиссионных потерь через отдельные ограждающие конструкции с учетом географической ориентации: $Q_{\text{тр}} = \sum_1^n Q_{\text{тр}}^n$.

Расход теплоты $Q_{\text{в}}$, Вт, на нагревание вентиляционного воздуха в помещениях жилых и общественных зданий при естественной вытяжной вентиляции, компенсируемого подогретым приточным воздухом [12]:

$$Q_{\text{в}} = 0,28L_n \rho c (t_{\text{вн}} - t_{\text{п}}) (1 - k_{\text{рег}}), \quad (3)$$

где $L_n = 3 \times 200$ – расход удаляемого воздуха, м³/ч, не компенсируемый подогретым приточным воздухом, для жилых зданий – удельный нормативный расход 3 м³/ч на 1 м² жилых помещений; $k_{\text{рег}}$ – коэффициент регенерации (принят 0,8).

Затраты эксергии

Полные затраты эксергии на создание и последующую эксплуатацию объекта оцениваются в виде суммы произведений затрат энергии на коэффициент качества (эксергетический КПД):

$$E_{\Sigma} = E_{\kappa\Sigma} + E_{\text{о}\Sigma} = \Sigma Q_{\kappa i} \eta_{ei}^0 + Q_{\text{о}} \eta_e^0 = Q_{\kappa\Sigma} + Q_{\text{о}\Sigma} (1 - T_2/T_1), \quad (4)$$

где $E_{\kappa\Sigma} = \Sigma Q_{\kappa i} \eta_{ei}^0$ – суммарные затраты эксергии на изготовление материалов здания; $E_{\text{о}\Sigma} = Q_{\text{о}} \eta_e^0 = Q_{\text{о}\Sigma} (1 - T_2/T_1)$ – затраты эксергии на отопление и вентиляцию; T_1, T_2 – температуры источника тепловой энергии и окружающей среды соответственно, К.

При использовании разных материалов для создания здания (i) и продолжительности строительства (t_1) суммарные затраты эксергии на изготовление материалов и строительство здания:

$$E_{\kappa\Sigma} = \int_0^{t_1} \int_1^n Q_{\kappa i} \eta_{ei}^k di dt = \iint Q_{\kappa i} \eta_{ei}^k didt. \quad (5)$$

При использовании электрической и высокопотенциальной тепловой энергии $\eta_{ei}^k \cong 1$, и (5) приобретает вид

$$E_{\kappa\Sigma} = Q_{\kappa\Sigma}. \quad (6)$$

Затраты эксергии на отопление и вентиляцию на протяжении всего периода эксплуатации здания (t_2) при условиях постоянства температуры источника теплоты (T_1) и средней температуры окружающей среды отопительного периода (T_2) приобретают вид:

$$E_{\text{о}\Sigma} = \int_0^{t_2} Q_{\text{о}} \eta_e^0 dt = Q_{\text{о}\Sigma} (1 - T_2/T_1) \tau_{\text{от}}. \quad (7)$$

С учетом неравноценности эксергии, получаемой в ближайшем и отдаленном будущем, подобно аналогичным расчетам в экономике [13], может быть введено дисконтирование эксергии. Тогда полный

расход эксергии E вычисляется как интеграл с весовой функцией, отражающей убывание во времени:

$$E = \int_0^{\tau_3} \dot{E} \exp(-\lambda \tau) d\tau \approx \dot{E} [1 - \exp(-\lambda \tau_3)] = \dot{E}(\tau_3) \bar{\lambda}, \quad (8)$$

где

$$\bar{\lambda} = (\tau_3/\tau_3) [1 - \exp(-\lambda \tau_3)]. \quad (9)$$

Здесь $\tau_3 = 1/\lambda$ – нормативное время дисконтирования, обратное степени дисконтирования λ . Фактор $\bar{\lambda} < 1$ монотонно возрастает с ростом отношения τ_3/τ_3 . Для учета истощения первичных энергоресурсов аналогичный прием проводится с величиной η_e , что отражает геологические прогнозы о повышении затрат эксергии на добычу ресурса:

$$E_{\text{отв}} = \int E_{\text{отв}} \exp(-\mu \tau) d\tau = \dot{E}_{\text{отв}} \tau_3 \bar{\mu} \quad (10)$$

(здесь коэффициент μ играет ту же роль, что и степень дисконтирования λ , но при оценке истощения ресурсов; $\bar{\mu}$ вычисляется аналогично $\bar{\lambda}$).

Критерии определения оптимальной тепловой защиты зданий

Для определения условий оптимальности при решении (1) – (7) необходимо выразить расходы соответствующих затрат – финансовых, энергетических и эксергетических – в виде обобщенных функций от конструктивных, теплофизических и климатологических характеристик. Например, для энергии – в виде функций типа

$$Q_{\kappa i} = \Phi_1(M_i, q_i); Q_{\text{о}} = \Phi_2(M_i, Z),$$

где Φ_1 – функция энергоемкости материальных затрат; Φ_2 – функция энергоемкости эксплуатационных затрат; M_i, q_i, Z – количество используемых материалов, удельная энергоемкость производства материалов и показатель градусо-суток отопительного периода (ГСОП) соответственно.

Для финансовых и эксергетических затрат используются удельные стоимости материалов и удельные затраты эксергии.

Значение оптимума во всех случаях определяется минимумом совокупных затрат за весь период эксплуатации здания:

$$\partial Q_{\Sigma} / \partial M \Rightarrow 0; \partial E_{\Sigma} / \partial M \Rightarrow 0; \partial C_{\Sigma} / \partial M \Rightarrow 0,$$

где $Q_{\Sigma}, E_{\Sigma}, C_{\Sigma}$ – совокупные затраты энергии, эксергии и финансов.

Результаты исследования

Расчетные исследования выполнялись численно при помощи разработанного программного комплекса, включающего модули энергетических и климатических характеристик.



Результаты расчетов расходов энергии, эксергии и финансовых затрат для здания, выполненного из кирпича, приведены на рис. 2-5.

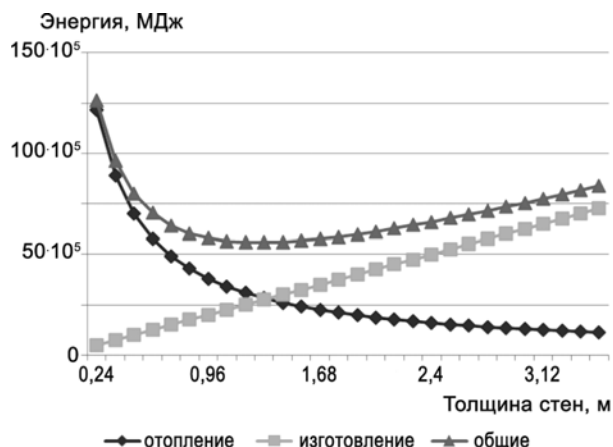


Рис. 2. Расход энергии на создание и энергоснабжение здания из кирпича

Fig. 2. Energy expenditure to create and energy supply of a building of brick

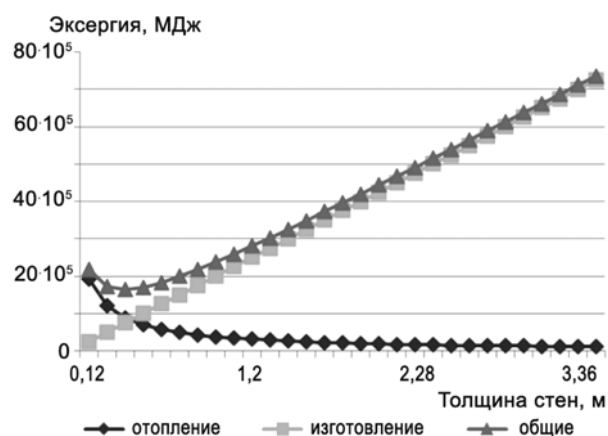


Рис. 3. Расход эксергии на создание и энергоснабжение здания из кирпича

Fig. 3. Exergy expenditure to create and energy supply of a building of brick

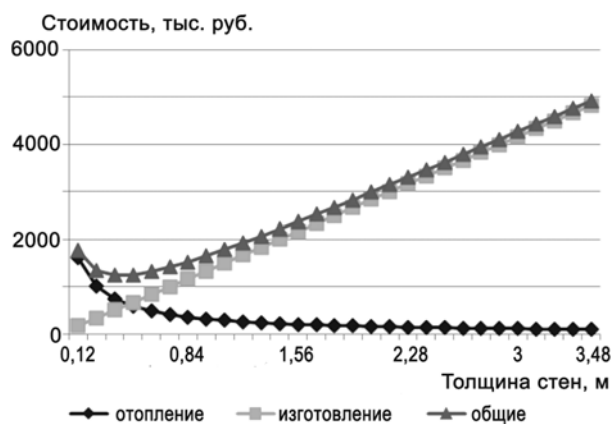


Рис. 4. Финансовые расходы на создание и энергоснабжение здания из кирпича (тариф 350 руб./Гкал)

Fig. 4. Financial expenses to create and energy supply of a building of brick (tariff of 350 rubles/Gcal)

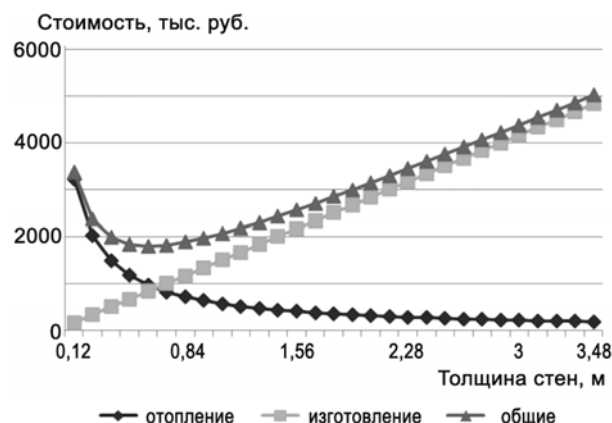


Рис. 5. Финансовые расходы на создание и энергоснабжение здания из кирпича (тариф 700 руб./Гкал)

Fig. 5. Financial expenses to create and energy supply of a building of brick (tariff of 700 rubles/Gcal)

Значения полученных по данной методике толщин защитной стены из кирпича приведены в табл. 3.

Таблица 3

Оптимальные значения толщины тепловой защиты и общего расхода ресурса (кирпич)

Table 3

The optimum thicknesses of thermal protection and overall consumption of resources (brick)

Критерий оптимальности	Толщина стены, м	Оптимум
Расход энергии, ГДж ($\partial Q_{\Sigma} / \partial M \Rightarrow 0$)	1,32	5400
Расход эксергии, ГДж ($\partial E_{\Sigma} / \partial M \Rightarrow 0$)	0,36	1900
Финансовые затраты, тыс. руб. ($\partial C_{\Sigma} / \partial M \Rightarrow 0$)		
тариф 350 руб./Гкал	0,35	1100
тариф 700 руб./Гкал	0,6	1800

Результаты расчетов общих затрат эксергии на создание и эксплуатацию зданий из разных материалов приведены на рис. 6.

В России (Уральский Федеральный университет и Уральская «Диатомитовая компания») выполнены научные исследования и разработки технологии, обосновывающие возможность производства пористого керамического кирпича из природного материала – диатомита. Полученные результаты показывают наличие у данных материалов высокой прочности и низкой теплопроводности при существенно более низкой энергоёмкости процесса получения, чем у волокнистых теплоизоляционных материалов [14]. На рис. 7 приведены данные оценки расходов эксергии на создание и энергоснабжение здания из диатомитового кирпича.

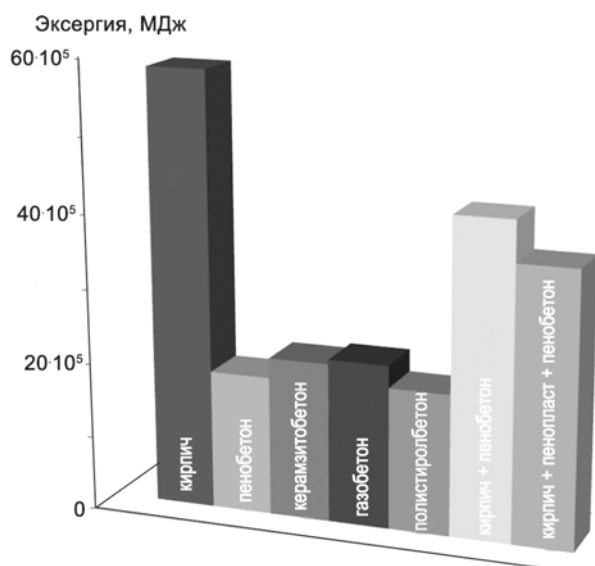


Рис. 6. Общий расход эксергии на создание и эксплуатацию зданий из разных материалов с эксергетически оптимальным слоем тепловой защиты

Fig. 6. Total consumption of exergy in the establishment and operation of buildings of different materials with exergic optimal thermal protection layer

Обсуждение результатов

Из рис. 2-7 видно, что все исследованные параметры имеют оптимальные значения (минимумы) при соответствующих значениях толщины защиты. Энергетический критерий оптимальности приводит к существенно завышенному уровню толщины тепловой защиты; финансовые затраты имеют высокую чувствительность к уровню цен на топливо и материалы, но более близки к результатам оптимизации по эксергетическому критерию. Последний дает значение, соответствующее современному уровню энер-

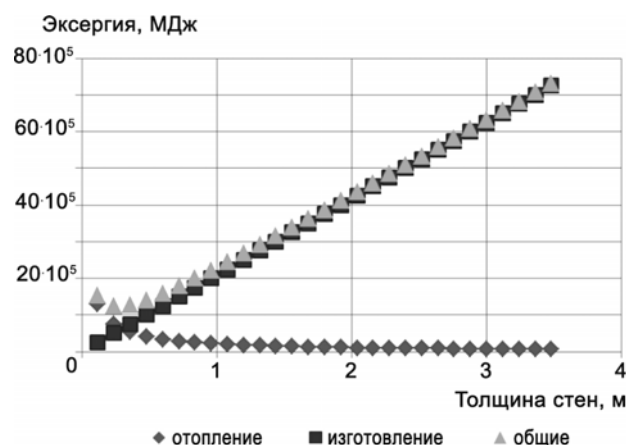


Рис. 7. Расход эксергии на создание и энергоснабжение здания из диатомитового кирпича

Fig. 7. Exergy expenditure to create and energy supply of a building of diatomite bricks

Список литературы

1. Мейер-Бое В. Строительные конструкции зданий и сооружений. Пер. с нем. под ред. Казбек-Казиева З.А. М.: Стройиздат, 1993.
2. Ананьев А.И., Комов В.М. и др. Экономия тепловых ресурсов в жилых зданиях // Теплоэнергоэффективные технологии: ИБ. 2001. № 4. С. 74–80.
3. Пирогов А.Н., Щеклеин С.Е. Энергетический дизайн – новый концептуальный подход при проектировании и строительстве энергоэффективных и экологических малоэтажных жилых зданий. Научно-практическая конференция «Энерго- и ресурсоэффективность малоэтажных жилых зданий». ИТФ СО РАН, 2013. С. 67–72.
4. Савин В.К. Энергоэффективность наружных конструкций зданий // Энергосбережение. 2002. № 6. С. 63–66.

References

1. Mejer-Boe V. Stroitel'nye konstrukcii zdaniy i sooruzhenij. Per. s nem. pod red. Kazbek-Kazieva Z.A. M.: Strojizdat, 1993.
2. Anan'ev A.I., Komov V.M. i dr. Èkonomiâ teplovykh resursov v žilyh zdaniâh // Teploènergoèffektivnye tehnologii: IB. 2001. № 4. S. 74–80.
3. Pirogov A.N., Šeklein S.E. Ènergetičeskij dizajn – novyj konceptual'nyj podhod pri proektirovanii i stroitel'stve ènergoèffektivnyh i èkologičnyh maloètažnyh žilyh zdaniy. Naučno-praktičeskââ konferenciâ «Ènergo- i resursoèffektivnost' maloètažnyh žilyh zdaniy». ITF SO RAN, 2013. S. 67–72.
4. Savin V.K. Ènergoèffektivnost' naružnyh konstrukcij zdaniy // Ènergobereženie. 2002. № 6. S. 63–66.

5. Степанов В.С., Степанова Т.Б. Эффективность использования энергии. Новосибирск: ВО «Наука», Сибирская издательская фирма, 1994.

6. Кононов Ю.Д. Влияние энергетических стратегий на энергопотребление. Иркутск: СЭИ, 1985.

7. Бродянский В.М., Верхивкер Г.П., Карчев Я.Я. и др. Эксергетические расчеты технических систем. Киев: Наук. думка, 1991.

8. http://www.naftaros.ru/kompozitsionnye_bazaltovye_tehno.

9. Исакович Г.А., Слуцкий Ю.Б. Экономия топливно-энергетических ресурсов в строительстве. М.: Стройиздат, 1988.

10. Санитарно-эпидемиологические требования к условиям проживания в жилых зданиях и помещениях» (СанПиН 2.1.2. 2645-10) // Портал Гарант.РУ.

11. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Выпуск 9. СПб.: Гидрометиздат, 1990.

12. СНиП 23-02-2003 «Тепловая защита зданий». М.: Госстрой России, ФГУП ЦПП, 2004.

13. Янговский Е.И. Энергия – нетто // Промышленная энергетика. 1985. № 1. С. 33-37.

14. Shcheklein S.E., Shastin A.G., Domanskaya I.K. Prospects of the application of curable decontamination solutions in problems of impact improving of nuclear power plants // WIT Transactions on Ecology and the Environment. 2014. Vol. 190, No. 2. P. 927-934.

5. Stepanov V.S., Stepanova T.B. Èffektivnost' ispol'zovaniâ ènergii. Novosibirsk: VO «Nauka», Sibirskaa izdatel'skaâ firma, 1994.

6. Kononov Û.D. Vliânie ènergetičeskikh strategij na ènergopotreblenie. Irkutsk: SÈI, 1985.

7. Broďanskij V.M., Verhivker G.P., Karčev Â.Â. i dr. Èksergetičeskie rasčety tehničeskikh sistem. Kiev: Nauk. dumka, 1991.

8. http://www.naftaros.ru/kompozitsionnye_bazaltovye_tehno.

9. Isakovič G.A., Sluckin Û.B. Èkonomiâ toplivno-ènergetičeskikh resursov v stroitel'stve. M.: Strojizdat, 1988.

10. Sanitarno-èpidemiologičeskie trebovaniâ k usloviâm proživaniâ v žilyh zdaniâh i pomešeniâh» (SanPiN 2.1.2. 2645-10) // Portal Garant.RU.

11. Naučno-prikladnoj spravočnik po klimatu SSSR. Vypusk 9. SPb.: Gidrometizdat, 1990.

12. SNIP 23-02-2003 «Teplovaâ zašita zdanij». M.: Gosstroj Rossii, FGUP CPP, 2004.

13. Ântovskij E.I. Ènergiâ – netto // Promyšlennaâ ènergetika. 1985. № 1. S. 33-37.

14. Shcheklein S.E., Shastin A.G., Domanskaya I.K. Prospects of the application of curable decontamination solutions in problems of impact improving of nuclear power plants // WIT Transactions on Ecology and the Environment. 2014. Vol. 190, No. 2. P. 927-934.

Транслитерация по ISO 9:1995

