

УДК. 658.26

К ПРОБЛЕМЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ ЗДАНИЙ

Щеклеин С.Е.

Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург

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 влечёт за собой увеличение энергозатрат на производство тепловой изоляции [1]. Идея использовать количество энергии в качестве меры стоимости объекта была предложена еще в 1883 году В.И. Вернадским и получила развитие в работах ряда отечественных и зарубежных исследователей [3-7]. 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].

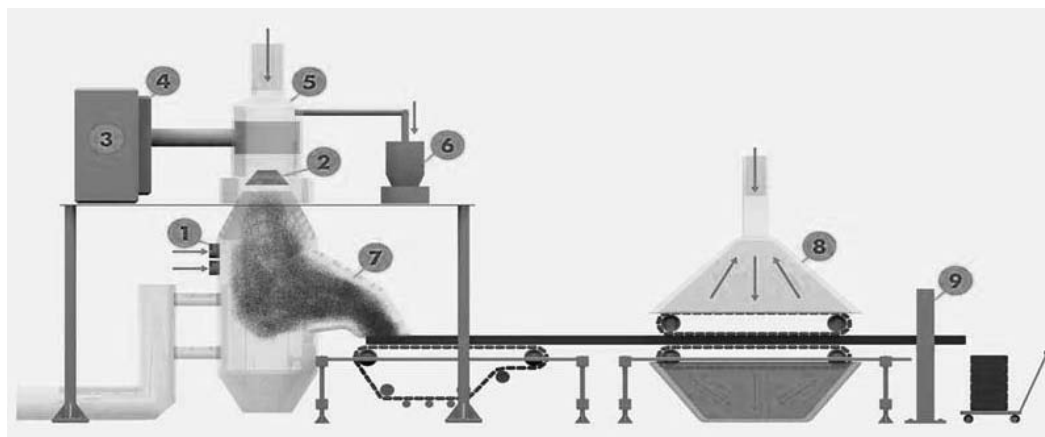


Рис. 1. Схема технологического модуля производства базальтоволоконной теплоизоляции. 1 - распылители связующего, 2 - дутьевая головка, 3 - генератор, 4 - блок нагрузочного контура, 5 - индукционная печь, 6 - дозатор, 7 - камера волокноосаждения, 8 - камера сушки, 9 - резак.

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].

Вид ресурса	Количество
Базальтового сырья, кг	1250
Электроэнергии, кВт*ч	3500
Сжатого воздуха, м ³	12000
Технической воды, м ³	260
Электродов, кг	25

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].

Таблица 2. Расход энергетических ресурсов для производства ряда строительных материалов.

Перечень материалов и конструкций	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,	7830
Бетонные монолитные конструкции, м ³	3944
Раствор марки М50, м ³	1682
Раствор марки М200, м ³	4437

1. 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.

2. Методика исследований

2.1 Затраты энергии

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

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

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

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

$$Q_{от} = Q_{mp} + Q_{в} - Q_{быт} \quad (2)$$

где

$Q_{mp}^n = A(t_p - t_{ext}) \cdot (1 + \Sigma\beta)n / R$, - 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 в помещении, °C;

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:

$$Q_{mp} = \sum_1^n Q_{mp}^n$$

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

$$Q_{в} = 0,28 \cdot L_n \cdot \rho \cdot c \cdot (t_{вн} - t_p) \cdot (1 - k_{рек}) \quad (3)$$

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; $k_{рек}$ - коэффициент регенерации (принят 0,8).

2.2 Затраты эксергии.

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

$$E_{\Sigma} = E_{к\Sigma} + E_{о\Sigma} = \Sigma Q_{ki} \cdot \eta_{ei}^o + Q_o \cdot \eta_e^o = Q_{к\Sigma} + Q_{о\Sigma} \cdot \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right), \quad (4)$$

где

$E_{к\Sigma} = \Sigma Q_{ki} \cdot \eta_{ei}^o$ - суммарные затраты эксергии на изготовление материалов здания

$$E_{о\Sigma} = Q_o \cdot \eta_e^o = Q_{о\Sigma} \cdot \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \quad - \text{затраты эксергии на отопление и}$$

вентиляцию.

T_1, T_2 – температуры источника тепловой энергии и окружающей среды, соответственно, °С.

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

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

При использовании электрической и высокопотенциальной тепловой энергии $\eta_{ei}^k \cong 1$.

и выражение (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) приобретает вид:

$$E_{o\Sigma} = \int_0^{t_2} Q_o * \eta_e^o dt = Q_{o\Sigma} * (1 - T_2 / T_1) * \tau_{om} \quad (7)$$

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:

$$E = \int_0^{\tau_2} \dot{E} \exp(-\lambda \tau) d\tau \approx \dot{E} [1 - \exp(-\lambda \tau_2)] = \dot{E}(\tau_2) \bar{\lambda}, \quad (8)$$

где

$$\bar{\lambda} = \frac{\tau_\lambda}{\tau_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{\tau_2}{\tau_\lambda}\right) \right] \quad (9)$$

Здесь $\tau_\lambda = 1/\lambda$ - нормативное время дисконтирования, обратное степени дисконтирования λ . Фактор $\bar{\lambda} < 1$ монотонно возрастает с ростом отношения τ_λ/τ_2 . Для учета истощения первичных энергоресурсов аналогичный прием проводится с величиной η_e , что отражает геологические прогнозы о повышении затрат эксергии на добычу ресурса:

$$E_{омв} = \int E_{омв} \exp(-\mu \tau) d\tau = \dot{E}_{омв} \tau_2 \bar{\mu} \quad (10)$$

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

2.3 Критерии определения оптимальной тепловой защиты зданий.

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

$$Q_{\kappa i} = \phi_1(M_i, q_i)$$

$$Q_o = \phi_2(M_i, Z)$$

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.

3. 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 ряда материалов приведены на (рис. 2 – 5).

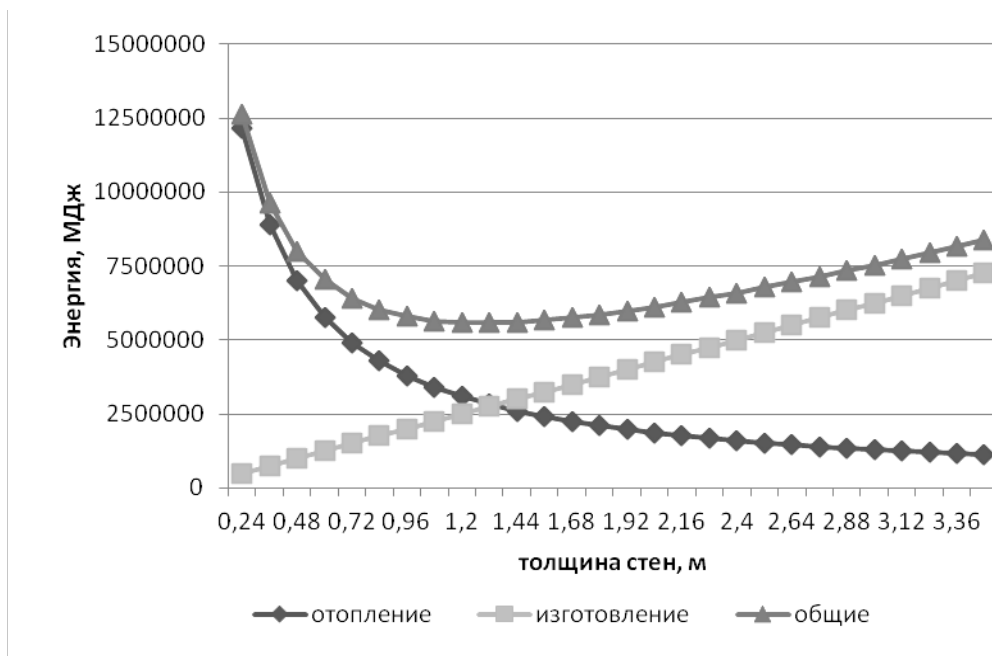


Рис. 2. Расход энергии на создание и энергоснабжение здания из кирпича.

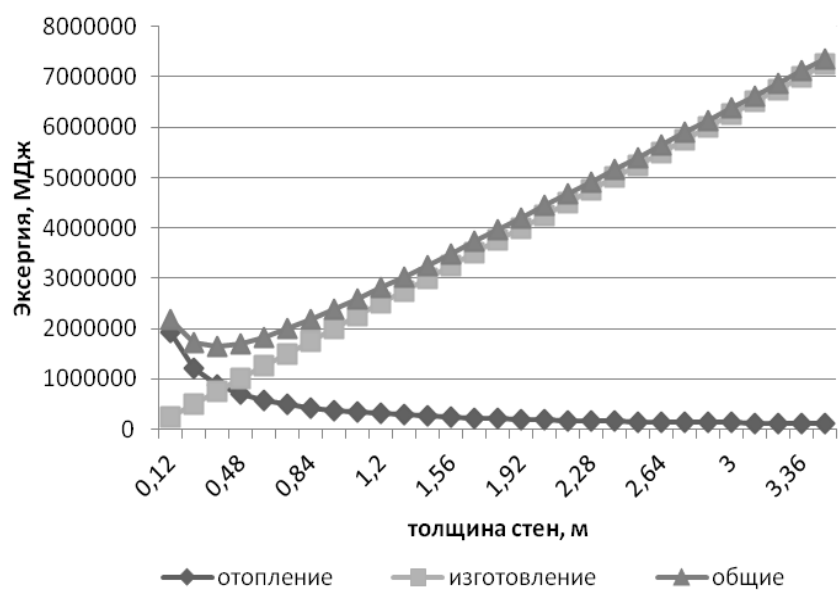


Рис. 3. Расход эксергии на создание и энергоснабжение здания из кирпича.

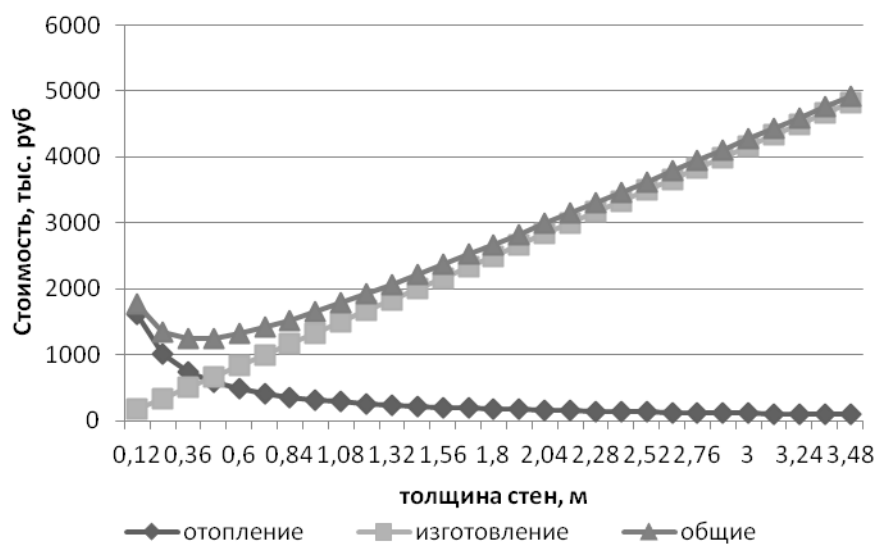


Рис. 4. Финансовые расходы на создание и энергоснабжение здания из кирпича (тариф 350 руб/Гкал).

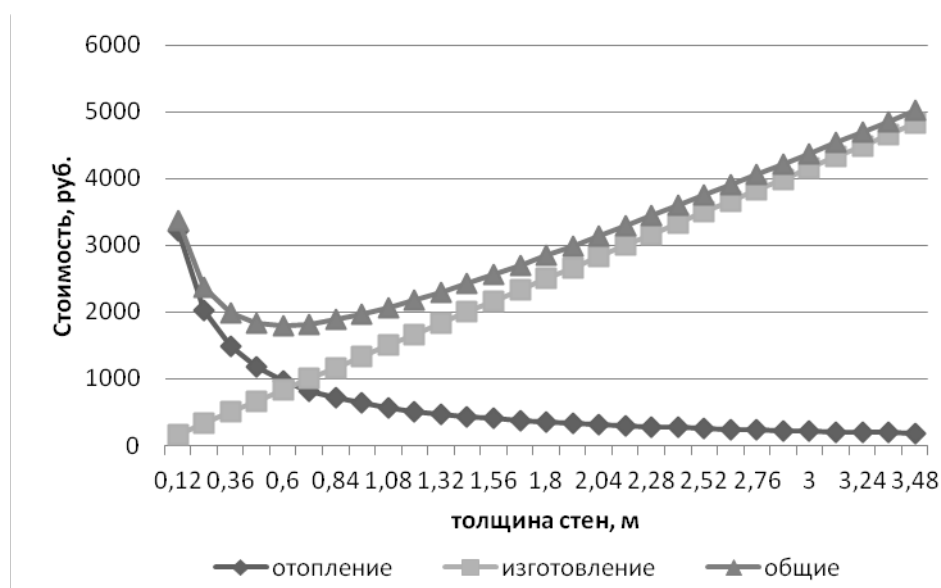


Рис. 5. Финансовые расходы на создание и энергоснабжение здания из кирпича (тариф 700 руб/Гкал).

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

Таблица 3. Оптимальные значения толщины тепловой защиты и общего расхода ресурса (кирпич).

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

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

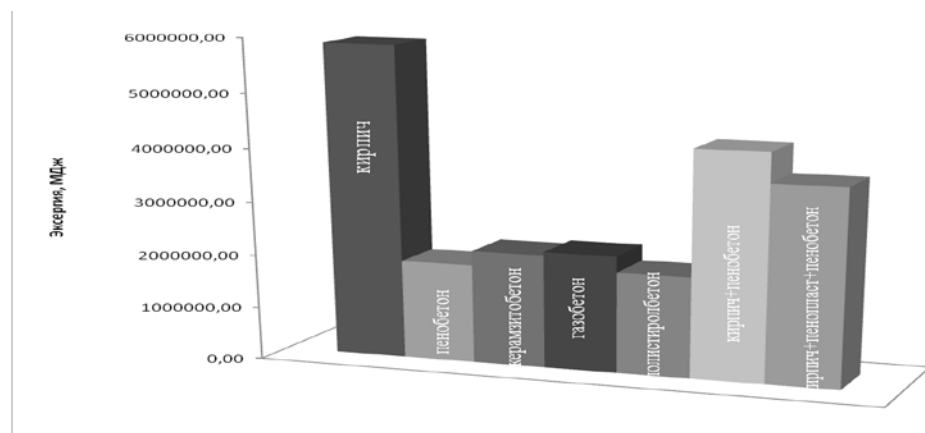


Рис. 6. Общий расход эксергии на создание и эксплуатацию зданий из разных материалов с эксергетически оптимальным слоем тепловой защиты.

Обсуждение результатов

Из рисунков 2 – 5 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 энергоемкости процесса производства материалов и при совершенствовании технологии будет приводить к увеличению оптимального значения толщины при снижении общего уровня расходов.

Литература

1. Мейер-Бое В. Строительные конструкции зданий и сооружений. Пер. с нем. под ред. Казбек-Казиева З.А. // М.: Стройиздат, 1993г. 408с.
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 экологичных 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 №6, 2002. С.63-66
5. Степанов В. С., Степанова Т. Б. Эффективность использования энергии // Новосибирск, ВО «Наука», Сибирская издательская фирма, 1994. 257 с.
6. Кононов Ю. Д. Влияние энергетических стратегий на энергопотребление // Иркутск, СЭИ, 1985.
7. . Бродянский В. М., Верховкер Г. П., Карчев Я. Я. и др. Эксергетические расчеты технических систем // Киев, Наук. думка, 1991. 360 с.
8. http://www.naftaros.ru/kompozitsionnye_bazaltovye_tehno/
9. Исакович Г. А., Слуцкий Ю. Б. Экономия топливно-энергетических ресурсов в строительстве // Москва, Стройиздат, 1988. 214 с.
10. Санитарно- эпидемиологические требования к условиям проживания в жилых зданиях и помещениях» (СанПиН 2.1.2. 2645-10)
11. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Выпуск 9./С-Пб., Гидрометиздат, 1990. 557 с.
12. СНИП 23-02-2003 «Тепловая защита зданий»
13. Янтовский Е.И. Энергия – нетто // Промышленная энергетика, 1985. №1.С.33-37.