

1973. – 300 с.

2. *Эксергетические* расчеты технических систем: Справ. пособие / В.М. Бродянский, Г.П. Верхивкер, Я.Я. Карчев и др.; Под ред. А.А. Долинского, В.М. Бродянского. – К.: Наук. думка, 1991. – 360 с.

3. *Амерханов Р.А.* Оптимизация сельскохозяйственных энергетических установок с использованием возобновляемых видов энергии. – М.: Колос, 2003. – 532 с.

4. *Wu C. and Niculshin V.* Method of thermoeconomical optimization of energy intensive systems with linear structure on graphs // *International journal of Energy Research*, 24, 615-623 (2000).

5. *Bejan A., Tsatsaronis G., Moran M.* Thermal Design and Optimization. – New York; J. Wiley, 1996. – 530 p.

6. *Тсатсаронис Дж.* Взаимодействие термодинамики и экономики для минимизации стоимости энергопреобразующей системы (научн.

ред. и перев. с англ. проф. Т.В. Морозюк). – Одесса: Студия "Негоциант", 2002. – 152 с.

7. *Лозано М.А., Валеро А.* Теория эксергетической стоимости // *Энергия*, Т. 18, 1993, № 9. – Пергамон Пресс. – С. 939-960.

8. *Долинский А.А., Драганов Б.Х., Дубровин В.А.* Оптимизация технических систем методом эксергоэкономики // *Промышленная теплотехника*. – 2003. – № 4. – С. 28-31.

9. *Драганов Б.Х.* Термoeкономическая оптимизация энергетических систем при эксплуатационном и экологическом решениях их работы // *Экотехнологии и ресурсосбережение*. – 2006. – № 2. – С. 8-10.

10. *Долинский А.А., Драганов Б.Х., Морозюк Т.В.* Альтернативное теплоснабжение на базе тепловых насосов: критерии оценки // *Промышленная теплотехника*. – 2007. – Т. 29. – № 6. – С. 67-71.

Получено 18.12.2009 г.

УДК 644.1

Гридин С.В., Колесниченко Н.В., Носовская О.А.

Донецкий национальный технический университет

ОПТИМИЗАЦИЯ АККУМУЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ТИПОВОГО ЖИЛОГО ЗДАНИЯ

Акумуляційна система теплопостачання складається з електричних котлів та бака-акумулятора (БА). Для оптимізації системи визначено значення температур подачі води, об'ємів БА, характеристика опалювальних приладів і товщина ізоляційних плит з урахуванням мінімального терміну окупності.

Аккумуляционная система теплоснабжения состоит из электрических котлов и бака-акумулятора (БА). Для оптимизации системы определены интервалы значений температур подачи воды, объемов БА, характеристика отопительных приборов и толщина изоляционных плит с учетом минимального срока окупаемости.

Consider the system of accumulation for heating. It consists of electric boilers and tank battery. To optimize the system defined by intervals values of the temperature of water supply, the volume of the tank battery, the characteristic of heating appliances and the thickness of insulation boards subject to the minimum payback period.

B – расход;

c – теплоемкость;

F – площадь поверхности;

k – коэффициент теплопередачи;

$k \cdot F$ – характеристика отопительного прибора

после реконструкции;

$(k \cdot F)'$ – характеристика отопительного

прибора при температурном графике 95/70;

n – продолжительность;

Q – тепловая мощность, количество тепла;

Q_n^p – теплотворная способность природного газа;
 R – термическое сопротивление;
 t – температура;
 V – объём;
 z – отношение характеристики отопительных приборов до и после реконструкции;
 α – коэффициент теплоотдачи;
 Δ – разница;
 δ – толщина;
 η – коэффициент полезного действия;
 λ – коэффициент температуропроводности;
 μ – коэффициент паропроницаемости;
 ρ – плотность;
 τ – температура, определяемая по температурному графику;
 Z – затраты;
 Π – цена;
 T – срок;
 \mathcal{E} – экономия;
 БА – бак-аккумулятор.

Индексы верхние:

max – максимальное значение параметра;
 гк – газовая котельная;
 год – годовое значение параметра;
 рас – расчетное значение параметра при температуре воздуха наиболее холодной пятидневки;
 р – рабочее;
 уд – удельное значение параметра;

эк – электрическая котельная.

Индексы нижние:

1, 2 – значение параметра соответственно в подающей и обратной линии трубопровода;
 i – порядковый номер параметра;
 БА – бак-аккумулятор;
 в – вода;
 вн – значение параметра внутри помещения;
 г – природный газ;
 зу – значение параметра при зимних условиях;
 из – изоляция;
 из.ст – изолированная стена;
 мет – металлопрокат;
 мат – материалы;
 н – низшие;
 о – отопительный период;
 ок – окупаемость;
 общ – общие;
 пот – потери;
 пр – присоединение;
 сек – секции;
 ср – среднее;
 ср. о – среднее значение за отопительный период;
 ст – стена;
 т – тепло;
 ц – цена;
 эл – электроэнергия;
 э – электрический.

Повышение эффективности теплоснабжения является для Украины актуальной проблемой. Это связано с тем, что для теплоснабжения в основном используется дефицитное топливо – природный газ. Одним из вариантов экономии средств и повышения надежности теплоснабжения является использование электроэнергии по ночному тарифу. Такое использование позволяет выравнять суточный график электропотребления и таким образом оказывает положительное влияние на энергосистему. Кроме того, стоимость единицы теплоты, полученной в электрокотле по ночному тарифу, меньше стоимости получения его в газовой котельной. Если доба-

вить еще и экологический эффект, то данное направление в теплоснабжении видится перспективным.

Однако такая система требует устройства системы аккумуляции тепла, необходимого для осуществления нагрузки отопления в дневное время. Проблеме аккумуляции тепла посвящены разработки многих авторов. Работы одних авторов посвящены изучению физической сущности аккумуляции тепла [1], а других – разработке разнообразных систем аккумуляции [2]. Аккумуляцию тепла можно осуществить, например, в системах напольного отопления, как водяного, так и электрического.

Однако, если рассматривать возможность реконструкции существующих зданий, то такой вариант нереален. В таком случае для зданий, оборудованных радиаторными системами отопления, необходима установка бака-аккумулятора.

В данной статье рассматривается система теплоснабжения, в которой источником тепла является электростанция, а в качестве аккумулятора используем БА [3,4], температура которого после его полной зарядки составляет 90...95 °С. Кроме того, поскольку капитальные затраты на устройство системы зависят от мощности оборудования, то исследована также зависимость срока окупаемости реконструкции при повышении тепловой защиты здания за счет применения наружного утепления стен.

Целью исследования является: определение целесообразности реконструкции существующих систем отопления с использованием электрических котлов и системы аккумуляции тепла в виде БА; изучение влияния параметров системы (температура подачи воды в отопительную систему, объем БА, характеристика отопительных приборов, толщина изоляции на наружных стенах здания) на экономические показатели.

Нагрузка отопления и годовое потребление тепла зависят от климатических условий, которые характеризуются продолжительностью отопительного периода, средней температурой за отопительный период и расчетной отопительной температурой, определяемой как температура наиболее холодной пятидневки. Диапазон этих значений для Украины находится в следующих интервалах: n_o (126 сут.;195 сут.); $t_{cp,o}$ (5,2 °С; -2,5 °С) и t_o^{pac} (-6 °С; -25 °С). Город Донецк находится в средних климатических условиях ($n_o = 183$ сут., $t_{cp,o} = -1,8$ °С, $t_o^{pac} = -23$ °С), которые характерны для многих городов Украины.

Рассмотрим типовой пятиэтажный жилой дом, принятый в эксплуатацию в 1986 году, расположенный в городе Донецке. Для выбранного здания на основании методики, изложенной в [5], геометрических и теплотехнических характеристик были определены: тепловые потери

отдельных ограждающих конструкций и расчетная отопительная нагрузка дома, равная $Q_o^{pac} = 456,1$ кВт. Здание оборудовано приборами отопления – чугунными радиаторами типа М -90. Источником теплоснабжения здания является районная водогрейная котельная, работающая на природном газе.

Мощность электрической котельной, работающей только в ночное время должна удовлетворять ночную нагрузку отопления, а также заряжать бак-аккумулятор. Причем зарядки БА должно хватить днем на осуществление необходимой нагрузки отопления. Таким образом, установленная мощность котельной должна превышать расчетную нагрузку отопления в 3 раза и для нашего здания будет равна 1368 кВт.

Так как расчетный температурный график системы отопления 95/70, а максимальная температура в БА также равна 95 °С, то в обязательном порядке необходимо осуществить реконструкцию системы отопления с переходом на пониженный температурный график. Это повлечет за собой увеличение поверхности отопительных приборов. Однако такое увеличение не может быть большим, поскольку размер отопительного прибора ограничен размером подоконной ниши. Из выражения для определения тепловой мощности отопительных приборов:

$$Q_o^{pac} = k \cdot F \cdot \Delta t_{cp} = k \cdot F \cdot \frac{t_1 - t_2}{\ln \frac{t_1 - t_{BH}}{t_2 - t_{BH}}}, \quad (1)$$

приняв $t_{BH} = 20$ °С, а также $t_1 - t_2 = 25$ °С определим зависимость z от температуры воды в подающей линии системы отопления:

$$z = k \cdot F / (k \cdot F)'. \quad (2)$$

Данная зависимость показана на рис. 1.

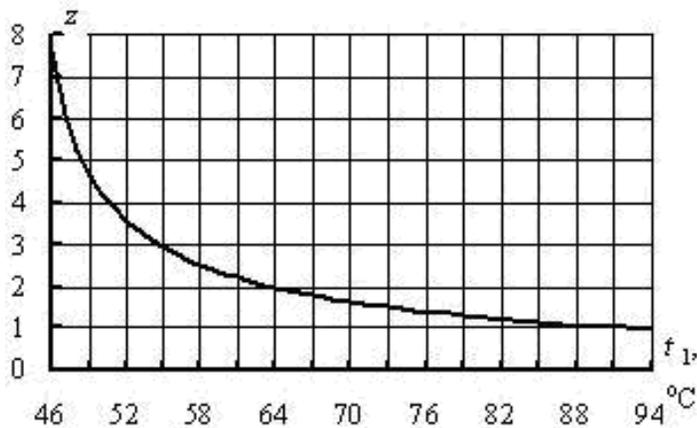


Рис. 1. Зависимость относительного увеличения поверхности отопительных приборов от температуры подачи.

В типовой жилой комнате рассматриваемого здания длина ниши – 1,4 м, ширина одной секции отопительного прибора – 0,1 м, тепловая отдача секции – 210 кВт [6]. Поэтому максимальное количество секций, которое помещается в подоконной нише – 14. До реконструкции в такой комнате установлен 6-ти секционный отопительный прибор. Таким образом, подоконная ниша позволяет максимально увеличить поверхность отопительного прибора в 2,33 раза. Из рис. 1 видно, что минимальная температура в подающей линии, до которой мы можем снизить расчетный температурный график, составит 61 °С. С другой стороны, от температурного графика зависит объем устанавливаемого бака-аккумулятора, м³:

$$V = \frac{Q_o^{pac} \cdot 16 \cdot 3600}{\rho_b \cdot c_b \cdot (t_b^{max} - t_1)} \quad (3)$$

На основании выражения (3) построим зависимость $V=f(t_1)$, которая изображена на рис. 2.

Из рис. 2 видим, что при температуре $t_1 > 85$ °С объем БА стремительно возрастает. Поэтому максимальное значение температуры подачи воды в систему отопления $t_1 \leq 85$ °С.

Таким образом, получаем интервал температур t_1 (60...85 °С), который соответствует возможной реконструкции системы отопления.

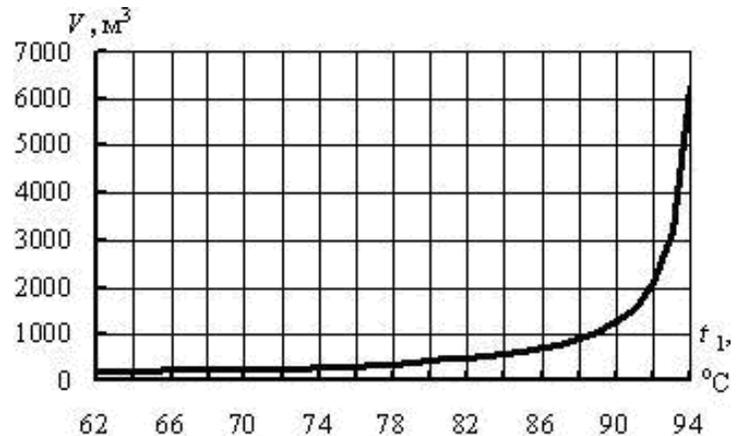


Рис. 2. Зависимость объема БА от температуры подачи воды t_1 .

Однако значение температур для теплоснабжения здания следует рекомендовать в пределах 82...85 °С, так как для выполнения на практике это более реальные значения. При этом, полученный интервал объемов БА для выбранного здания – 483...627 м³ соответственно. А удельное значение объема БА, приходящееся на 1 МВт расчетной тепловой нагрузки объекта, соответственно находится в интервалах 1059...1375 м³.

Определим затраты на реконструкцию системы отопления, установки БА и присоединения котельной к электросети. Цены на все материалы, оборудование, его подключение и установку приведены на начало 2009 г.

С учетом стоимости работ по установке БА и наличия свободного места удельная стоимость БА $Z_{ба}^{уд} = 500$ грн /м². Исходя из кубической формы бака, отношение поверхности и объема будут следующими:

$$F_{ба} = 6 \cdot (V)^{2/3} \quad (4)$$

Затраты на реконструкцию системы отопления с учетом стоимости работы составят: $Z_{ба}^{уд} = 120$ грн/сек.

Затраты на приобретение электродкотлов с их установкой $Z_{эк}$ и присоединение мощности 1368 кВт к электрической сети $Z_{пр}$ составят:

$$Z_{\text{эк+пр}} = Q_{\text{ист}} \cdot (\Pi_{\text{эк}}^{\text{уд}} + \Pi_{\text{пр}}^{\text{уд}}) \quad (5)$$

Принимаем $\Pi_{\text{эк}}^{\text{уд}}$ равной 400 грн./кВт, а $\Pi_{\text{пр}}^{\text{уд}}$ мощности к подстанции на стороне 35 кВ равной 700 грн./кВт.

Капитальные затраты на реконструкцию существенно зависят от электрической мощности котельной. Применение наружной изоляции стен здания позволяет не только снизить по-

требление энергии для отопления, но и уменьшить капитальные затраты на реконструкцию. Поэтому при планировании подобной реконструкции необходимо обязательно рассматривать целесообразность утепления ограждающих конструкций. Изоляция наружных стен здания приведет к снижению тепловых потерь. В качестве изоляции используем пенополистироловые плиты, которые имеют размеры 1×1 метр с толщиной, находящейся в интервале от 0,02 м до 0,1 м [7].

Табл. 1. Теплотехнические показатели материалов, используемые для изоляции стен

	Слой	ρ , кг/м ³	λ , Вт/м·°C	μ , мг/(м·ч·Па)
1	Плиты из пенополистирола	28	0,03	0,16
2	Декоративная штукатурка	800	0,16	0,06

Сопротивление теплопередачи изолированной внешней стены, (м²·°C)/Вт:

$$R_{\text{из ст}} = \frac{1}{\alpha_{\text{вн}}} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_{\text{зв}}} \quad (6)$$

$$\alpha_{\text{вн}} = 8,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C}); \alpha_{\text{зв}} = 23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C}).$$

Таким образом, тепловые потери через изолированные наружные стены составят, кВт :

$$Q_{\text{из.ст}} = F_{\text{ст}} \cdot (t_{\text{вн}} - t_{\text{ср.о}}) \cdot 10^{-3} / R_{\text{из ст}} \quad (7)$$

Поверхность стен рассматриваемого здания: $F_{\text{ст}} = 3473,6 \text{ м}^2$, средняя температура воздуха в городе Донецке за отопительный период $t_{\text{ср.о}} = -1,8 \text{ °C}$.

Потери тепловой энергии при изоляции стен уменьшаются на

$$\Delta Q = Q_{\text{ст}} - Q_{\text{из.ст}} \quad (8)$$

Годовую экономию тепла ΔQ год определяем согласно графику продолжительности значения температуры наружного воздуха. Соответствующая экономия природного газа составит,

м³:

$$\Delta B_{\text{г}} = \frac{\Delta Q^{\text{год}}}{Q_{\text{н}}^{\text{п}} \cdot \eta} \quad (9)$$

В формуле (9) учитываем, что $Q_{\text{н}}^{\text{п}} = 33520 \text{ кДж/м}^3$, $\eta = 0,9$.

Годовая экономия денежных средств при использовании изоляции определяется по формуле:

$$\Xi_{\text{из}} = \Delta B_{\text{г}} \cdot \Pi_{\text{г}}^{\text{уд}} \quad (10)$$

Принимаем удельную цену 1 м³ природного газа равной 1,97 грн./м³ при условии, что объем потребления природного газа превышает 12000 м³ за год.

Затраты на изоляцию наружных стен, грн.:

$$Z_{\text{из}} = Z_{\text{из}}^{\text{уд}} \cdot F_{\text{ст}} \quad (11)$$

Простой срок окупаемости всей реконструкции, лет:

$$T_{\text{ок}} = \frac{Z_{\text{общ}}}{\Xi_{\text{общ}}} \quad (12)$$

Общую экономию денежных средств определяем по следующей формуле :

$$\mathcal{E}_{\text{общ}} = \mathcal{E}_{\text{ц}} + \mathcal{E}_{\text{из}} \quad (13)$$

Экономию, полученную благодаря разнице тарифов, определяем по формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{ц}} = \mathcal{C}_{\text{т}}^{\text{гк}} - \mathcal{C}_{\text{т}}^{\text{эк}} \quad (14)$$

Стоимость годового количества газа, грн./год:

$$\mathcal{C}_{\text{т}}^{\text{гк}} = V_{\text{г}} \cdot \mathcal{C}_{\text{г}}^{\text{уд}} \quad (15)$$

$$\mathcal{C}_{\text{г}}^{\text{уд}} = 1,97 \text{ грн./м}^3$$

Годовой расход газа, м³:

$$V_{\text{г}} = \frac{Q_{\text{из}}^{\text{год}}}{Q_{\text{н}}^{\text{п}} \cdot \eta} \quad (16)$$

Стоимость годового количества электроэнергии, грн /год:

$$\mathcal{C}_{\text{т}}^{\text{эк}} = B_{\text{эл}} \cdot \mathcal{C}_{\text{эл}}^{\text{уд}} \quad (17)$$

Цена электроэнергии по ночному тарифу:

$$\mathcal{C}_{\text{эл}}^{\text{уд}} = 0,4 \cdot 0,24 = 0,096 \text{ грн /кВт}\cdot\text{ч.}$$

Годовой расход электроэнергии:

$$B_{\text{эл}} = \frac{Q_{\text{из}}^{\text{год}}}{\eta_{\text{э}} \cdot \eta_{\text{ба}}} \quad (18)$$

В формуле (18) принимаем $\eta_{\text{э}} = 0,9$, а $Q_{\text{из}}^{\text{год}}$ определяем по графику продолжительности значений температур наружного воздуха.

Коэффициент полезного действия БА определяем по формуле:

$$\eta_{\text{ба}} = \frac{Q_{\text{ба}} - Q_{\text{пот}}}{Q_{\text{пот}}} \quad (19)$$

Количество тепла, саккумулированное баком, кДж :

$$Q_{\text{ба}} = V \cdot \rho_{\text{в}} \cdot c_{\text{в}} \cdot (t_{\text{в}}^{\text{max}} - \tau_{\text{л}}) \quad (20)$$

Потери тепла через стенки БА, Вт :

$$Q_{\text{пот}} = \alpha \cdot F_{\text{ба}} \cdot (t_{\text{в}}^{\text{max}} - t_{\text{ср.о}}) \quad (21)$$

Результаты расчетов сроков окупаемости всех рассмотренных мероприятий при разных толщинах пенопластных плит представляем на рис. 3.

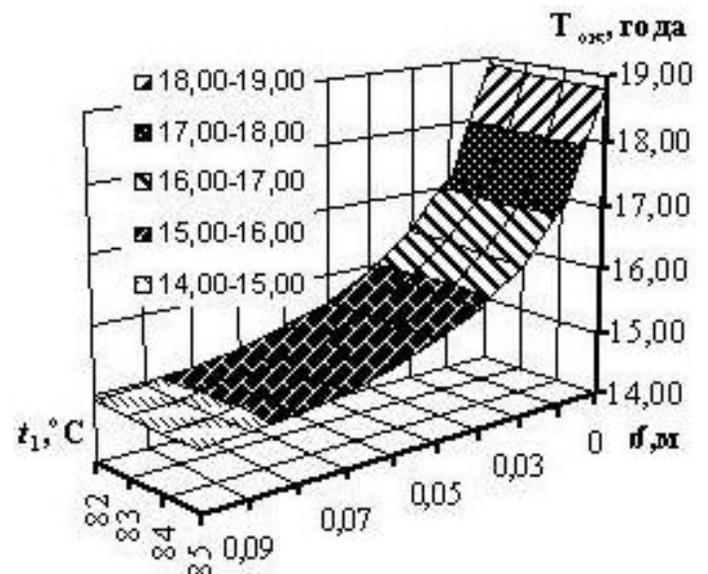


Рис. 3. Сводный график зависимости срока окупаемости от температуры подачи горячей воды и толщины изоляционной плиты.

Выводы

Перевод системы отопления с использования природного газа на использование электроэнергии по ночному тарифу влечет за собой необходимость устройства системы аккумуляции тепла. Причем, если это относится к существующим зданиям, оборудованным радиаторной системой отопления, то практически единственным вариантом является установка БА.

Такая реконструкция также влечет за собой реконструкцию отопительной системы

здания, поскольку система с БА не сможет поддерживать прежний температурный график в расчетном режиме. В приведенном исследовании определен возможный диапазон температур в подаче системы отопления 82...85 °С, для которого возможно и реально осуществима на практике реконструкция. Полученный диапазон удельного объема БА в расчете на 1 МВт расчетной нагрузки потребителя составляет от 1059 м³ при 82 °С до 1375 м³ при 85 °С температуры подачи.

Капитальные затраты на реконструкцию включают: стоимость оборудования с установкой, подключение к электросети, стоимость БА с изоляцией. Стоимость всех материалов, всего оборудования, его подключение и установка рассчитаны с учетом цен на начало 2009 г.

Снизить капитальные затраты, которые пропорциональны устанавливаемой мощности котельной, можно, повысив тепловую защиту здания. Критерием целесообразности приводимой реконструкции является срок окупаемости вложения денежных средств. В работе показано, что минимальный срок окупаемости без повышения тепловой защиты здания составляет 18,81 года и связан с наибольшей прибылью благодаря разнице цен на тепловую и электрическую энергию и минимумом затрат на соответствующую реконструкцию отопительной системы здания $z = k \cdot F / (k \cdot F)' = 1,197$. При повышении тепловой защиты здания достигается двойной эффект: уменьшается потребление энергии, необходимой на отопление, и снижается тепловая мощность котельной и связанные с ней капитальные затраты. При толщине изоляции равной 0,1 м достигается минимальный срок окупаемости, равный 14,92 лет, что меньше, чем вариант без дополнительной изоляции стен здания. К тому же изменяется и значение поверхности отопительных приборов и емкость БА.

Полученные результаты показывают, что в таком виде при существующих ценах на энергоносители срок окупаемости достаточно велик, чтобы считать такую реконструкцию целесообразной. К тому же не были учтены затраты на обслуживание системы.

Дальнейшие исследования связаны с изменением температуры наружного воздуха при которых БА будет самостоятельно и полностью удовлетворять дневную нагрузку отопления. При температурах, ниже этой, возникнет необходимость включения электрокотельной в дневное время. В таком случае необходимая мощность котельной, емкость БА уменьшатся, соответственно уменьшатся и капитальные затраты.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Левенберг В.Д., Ткач М.Р.* Аккумуляирование тепла. – К.: Техника, 1991. – 320с.
2. *Сотникова О.А., Турбин В.С.* Аккумуляторы тепла теплогенерирующих установок систем теплоснабжения // Журнал АВОК. – 2003. – Т. 18, № 5. – С. 65 – 71.
3. *Пишеничников В.И.* Монтаж и эксплуатация коммерческих водонагревателей // Журнал Аква – Терм. – 2009. – № 2. – С. 54 – 57.
4. *www.akteplo.ru.*
5. *ДСТУ ISO 6946 : 2007 (ISO 6446 : 1996).* Будівельні компоненти та будівельні елементи. Тепловий опір і коефіцієнт теплопередавання. Розрахунковий метод.
6. *Богуславский Л.Д., Малина В.С.* Санитарно – технические устройства зданий. – М.: Высшая школа, 1988. – 254 с.
7. *ДСТУ ISO 7345 : 2005 (ISO 7345: 1987, IOT).* Теплоізоляція. Фізичні величини та визначення понять.

Получено 12.10.2009 г.