

Надійшла до редакції 29 червня 2004 р.

ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС ПОМЕЩЕНИЯ С ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ КАБЕЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ ОТОПЛЕНИЯ

*Л.Ф. Черных, канд.техн.наук, ст.научн.сотр.
КиевЗНИИЭП*

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Введение в Украине льготных тарифов на электроэнергию и существенное ужесточение до средневропейского уровня отечественных нормативов сопротивления теплопередаче наружных ограждающих конструкций зданий, разработанные КиевЗНИИЭП [1], создали фундамент для внедрения в массовое строительство жилых и общественных зданий электрической кабельной системы отопления теплоаккумуляционного действия (ЭКСО-ТА) греющим полом [2]. При этом задачу расчета теплового режима помещения с ЭКСО-ТА следует рассматривать с «теплыми» трехслойными стенами с эффективными утеплителями.

В многоэтажных жилых зданиях худшим вариантом типового помещения является угловое помещение с двумя наружными стенами - фасадной с окном и торцевой - глухой (рис. 1).

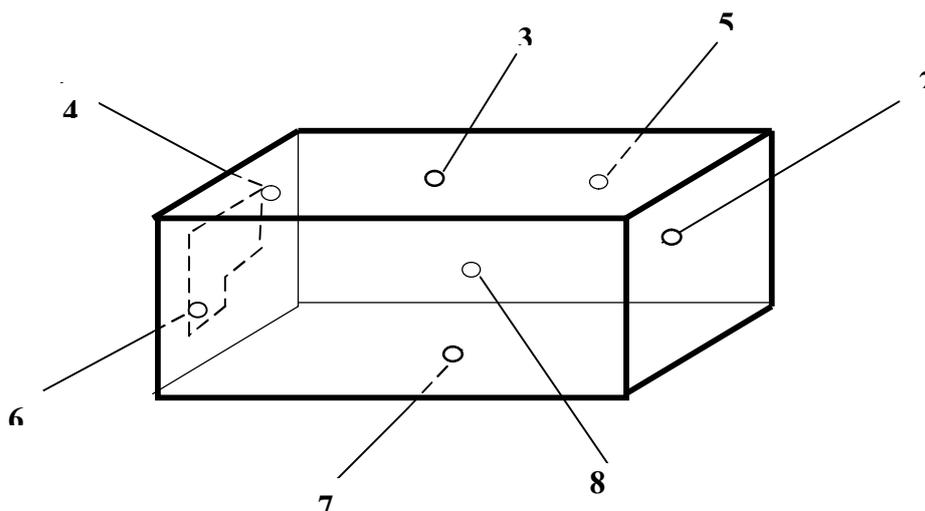


Рисунок 1 - Расчетная схема помещения:

- 1, 2 – внутренние стены, граничащие с другими помещениями;
- 3 – потолок, граничащий с другим жилым помещением;
- 4 – наружная фасадная стена с окном и балконной дверью;
- 5 – наружная торцевая стена;
- 6 – окно и балконная дверь;
- 7 – электропол

Физико-математическая постановка задачи теплопередачи трехслойных наружных стен (рис. 2) помещения с греющим полом имеет вид

$$\frac{\partial t_{k/i}(x, \tau)}{\partial \tau} = \alpha_{k/i} \frac{\partial^2 t_{k/i}(x, \tau)}{\partial x^2}; \quad \tau > 0; \quad l_{k-1/i} \leq x \leq l_{k/i}, \quad (1)$$

$$t_{k/i}(x, 0) = CM_{k/i}x + CM_{(k+3)/i}; \quad k=1,2,3; \quad i=4,5, \quad (2)$$

$$-\frac{\partial t_{1/i}(0, \tau)}{\partial x} + h_{H,i} t_{\bar{T}/i}(0, \tau) - h_{H,i} \cdot t_{H.в.}(\tau); \quad (3)$$

$$\lambda_{1/i} \frac{\partial t_{1/i}(l_{1/i}, \tau)}{\partial x} = \lambda_{2/i} \frac{\partial t_{2/i}(l_{1/i}, \tau)}{\partial x}, \quad (4)$$

$$\frac{1}{R_1} [t_{2/i}(l_{1/i}, \tau) - t_{1/i}(l_{1/i}, \tau)] = \lambda_{1/i} \frac{\partial t_{1/i}(l_{1/i}, \tau)}{\partial x}. \quad (5)$$

$$\lambda_{2/i} \frac{\partial t_{2/i}(l_{2/i}, \tau)}{\partial x} = \lambda_{3/i} \frac{\partial t_{3/i}(l_{2/i}, \tau)}{\partial x}; \quad (6)$$

$$\frac{1}{R_2} [t_{3/i}(l_{2/i}, \tau) - t_{2/i}(l_{2/i}, \tau)] = \lambda_{2/i} \frac{\partial t_{2/i}(l_{2/i}, \tau)}{\partial x}. \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial t_{3/i}(l_3, \tau)}{\partial x} + h_{в,3/i}(\tau) \cdot t_{3/i}(l_3, \tau) = \\ = h_{в,к,3/i}(\tau) t_{ср}(\tau) + h_{в,л,3/i} t_{R3/i}(\tau) \end{aligned} \quad (8)$$

Здесь и дальше введены обозначения согласно [3].

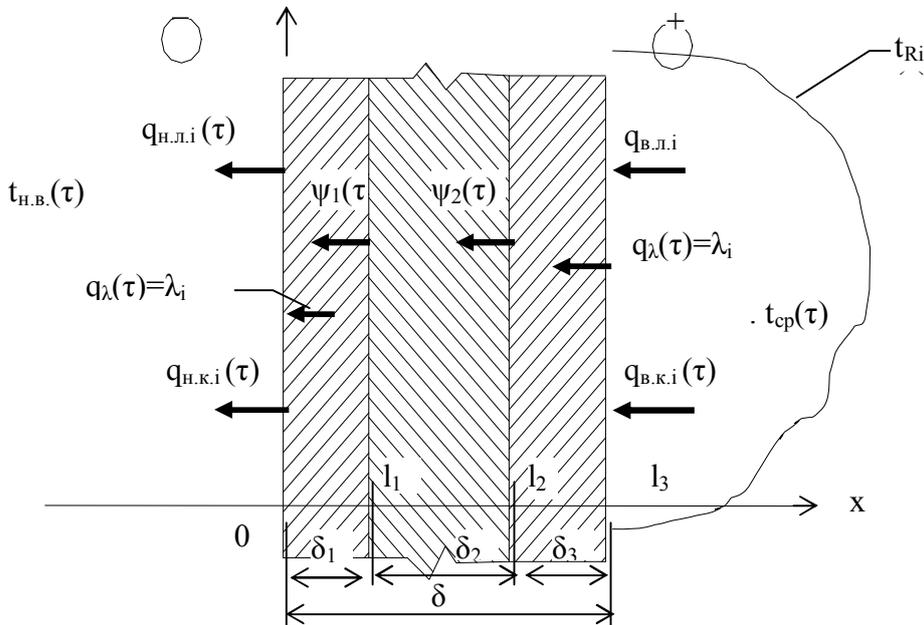


Рисунок 2 - Расчетная схема теплопередачи через трехслойную наружную стену при граничных условиях III рода

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Решение этой задачи определяет температурные поля в каждом слое трехслойных стен. Тепловой баланс помещения в значительной степени зависит от температуры внутренней поверхности этих «теплых» трехслойных стен. Применяя метод конечных интегральных преобразований [4-6] для решения этой системы (1)-(8), для внутренних поверхностей трехслойных стен при $x = l_{3/i}$, $i=4,5$, для момента времени τ_{j+1} , получим температуры в виде

$$\begin{aligned}
t_{i/3}(l_3, \tau_{j+1}) = & \sum_{\gamma=1}^{\infty} \left[A_{H,K,\gamma,3/i}(\tau_{j+1}) \cdot B_{H,\gamma,3/i}^2(\tau_{j+1}) \cdot I_{t_{cp,\gamma,3/i}}(\tau_{j+1}) + \right. \\
& + A'_{H,\lambda,\gamma,3/i}(\tau_{j+1}) \cdot B_{H,\gamma,3/i}^2(\tau_{j+1}) \cdot I_{t_{R3/i,\gamma}}(\tau_{j+1}) - \\
& - d_{70,\gamma,3/i}(\tau_{j+1}) \cdot B_{H,\gamma,3/i}(\tau_{j+1}) \cdot I_{\psi_{2,\gamma,3/i}}(\tau_{j+1}) + \\
& \left. + \bar{t}_{\gamma,3/i}(0) \cdot B_{H,\gamma,3/i}(\tau_{j+1}) \cdot e^{-R_{\gamma,3/i} \cdot \tau_{j+1}} \right]. \quad (9)
\end{aligned}$$

Из анализа этого уравнения видно, что оно является интегральным, так как в него входят интегралы по времени от 0 до τ_{j+1} от неизвестных температуры внутреннего воздуха $t_{cp}(\tau)$, радиационных температур $t_{Ri}(\tau)$ относительно всех поверхностей помещения и тепловых потоков $\psi_{2/i}(\tau)$ в месте контакта внутреннего слоя со средним слоем в точке $x = l_{2/i}$. Кроме того, уравнение (9) будет еще нелинейным по зависимости от температуры коэффициента конвективного теплообмена $\alpha_{B,K,i}(\tau_{j+1})$ этой поверхности с внутренним воздухом.

ПРИВЕДЕНИЕ УРАВНЕНИЙ ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕХСЛОЙНЫХ НАРУЖНЫХ СТЕН К КАНОНИЧЕСКОМУ ВИДУ

В [3] было показано, что в помещении с ЭКСО - ТА с однослойными наружными стенами задача расчета теплового режима сведена к системе семи интегральных и восьмого интегро-дифференциального уравнений, которые затем численным методом сведены к системе 8 алгебраических уравнений. При замене двух наружных стен на трехслойные необходимо, прежде всего, интегральные уравнения температур внутренних поверхностей этих стен превратить в алгебраические. Для этого применим численный метод замены интегралов конечными суммами с применением квадратурных формул Ньютона-Котесса [4]. Применение этих формул дает значение интегралов для моментов времени (τ_{j+1}):

$$I_{t_{cp,\gamma,i}}(\tau_{j+1}) = e^{-R_{\gamma,i} \cdot \Delta\tau} \cdot I_{t_{cp,\gamma,i}}(\tau_j) + [B_{0,\gamma,i} t_{cp}(\tau_j) + B_{1,\gamma,i} \cdot t_{cp}(\tau_{j+1})], \quad (10)$$

$$I_{t_{R,\gamma}}(\tau_{j+1}) = e^{-R_{\gamma,i} \cdot \Delta\tau} \cdot I_{t_{R,\gamma}}(\tau_j) + [B_{0,\gamma,i} \cdot t_{R}(\tau_j) + B_{1,\gamma,i} t_{R}(\tau_{j+1})], \quad (11)$$

$$\begin{aligned}
I_{\psi_{2,\gamma,k/i}}(\tau_{j+1}) = & e^{-R_{\gamma,k/i} \cdot \Delta\tau} \cdot I_{\psi_{2,\gamma,k/i}}(\tau_j) + [B_{0,\gamma,k/i} \cdot \psi_{2/i}(\tau_j) + \\
& + B_{1,\gamma,k/i} \cdot \psi_{2/i}(\tau_{j+1})] , \quad (12)
\end{aligned}$$

где введены следующие обозначения интегралов

$$I_{t_{cp,\gamma,i}}(\tau_{j+1}) = \int_0^{\tau_{j+1}} t_{cp,\gamma,i}(\omega) \cdot e^{-R_{\gamma,k/i}(\tau_{j+1}-\omega)} d\omega;$$

$$I_{R_{i,\gamma}}(\tau_{j+1}) = \int_0^{\tau_{j+1}} t_{R_{i,\gamma}}(\omega) \cdot e^{-R_{\gamma,k/i}(\tau_{j+1}-\omega)} d\omega;$$

$$I_{\psi_{2,\gamma,k/i}}(\tau_{j+1}) = \int_0^{\tau_{j+1}} \psi_{2/i}(\omega) e^{-R_{\gamma,k/i}(\tau_{j+1}-\omega)} d\omega .$$

Нелинейность по зависимости от температуры коэффициента конвективного теплообмена внутренней поверхности с воздухом помещения $\alpha_{B,K,i}(\tau)$ устраняется применением этого численного метода замены интегралов конечными суммами, когда решаем задачу на каждом малом промежутке времени, на котором этот коэффициент можно принять постоянным и считать его каждый раз на этих малых интервалах.

В представленной формуле (9) интегралы от тепловых потоков $I_{\psi 2, \gamma, k/i}(\tau_{j+1})$, интегралы от температуры воздуха $I_{t_{cp, \gamma, 3/i}}(\tau_{j+1})$ и от радиационной температуры $I_{t_{R3/i, \gamma}}(\tau_{j+1})$ распишем по формулам Ньютона-Котесса (10)-(12), а радиационную температуру – по формулам [8]:

$$t_{Ri, \gamma, 3/i}(\tau_{j+1}) = \frac{\sum_{j=1}^7 [t_j \cdot F_j] - t_i \cdot F_i}{\sum_{j=1}^7 F_j - F_i} . \quad (13)$$

Тогда для фасадной наружной стены $i=4$ получим температуру внутренней поверхности в каноническом виде

$$\begin{aligned} & -N_{4/3}(\tau_{j+1}) \cdot F_1 \cdot t_1(\tau_{j+1}) - N_{4/3} \cdot F_2 \cdot t_2 - N_{4/3} \cdot F_3 \cdot t_3 + 0 \cdot \psi_{1/4} + \\ & + Y_{2/4} \cdot \psi_{2/4} + 1 \cdot t_4 + 0 \cdot \psi_{1/5} + 0 \cdot \psi_{2/5} - N_{4/3} \cdot F_5 \cdot t_5 - \\ & - N_{4/3} \cdot F_6 \cdot t_6 - N_{4/3} \cdot F_7 \cdot t_7 - K_{4/3} \cdot t_{cp} = M_{4/3} . \end{aligned} \quad (14)$$

Для температуры внутренней поверхности t_5 (τ_{j+1}) торцевой наружной стены $i=5$, проделав все те же математические преобразования, получим уравнение в каноническом виде

$$\begin{aligned} & -N_{5/3}(\tau_{j+1}) \cdot F_1 \cdot t_1(\tau_{j+1}) - N_{5/3} \cdot F_2 \cdot t_2 - N_{5/3} \cdot F_3 \cdot t_3 + \\ & + 0 \cdot \psi_{1/4} + 0 \cdot \psi_{2/4} - N_{5/3} \cdot F_4 \cdot t_4 + 0 \cdot \psi_{1/5} + Y_{2/5} \cdot \psi_{2/5} + \\ & + 1 \cdot t_5 - N_{5/3} \cdot F_6 \cdot t_6 - N_{5/3} \cdot F_7 \cdot t_7 - K_{5/3} \cdot t_{cp} = M_{5/3} . \end{aligned} \quad (15)$$

Итак, получили в каноническом виде два уравнения (14) и (15) температур внутренних поверхностей фасадной и торцевой трехслойных наружных стен помещения с ЭКСО-ТА греющим полом.

АНАЛИЗ РЕШЕНИЯ

Достоверность полученных решений подтверждена теплотехническими испытаниями в климатическом комплексе КиевЗНИИЭП [3,7]. Экспериментальные значения температур внутренних поверхностей трехслойных наружных стен при суточном изменении температуры наружного воздуха по гармоническому закону [8]

$$t_{н.в.}(\tau) = t_0 - A \cos \frac{2\pi}{T}(\tau - \varphi)$$

для условий г. Киева в сопоставлении с расчетом приведены на рис.3. Обработка результатов эксперимента показывает, что среднее расхождение между расчетными и экспериментальными кривыми не превышает 6,1%, что говорит о высоком показателе для исследований такого типа.

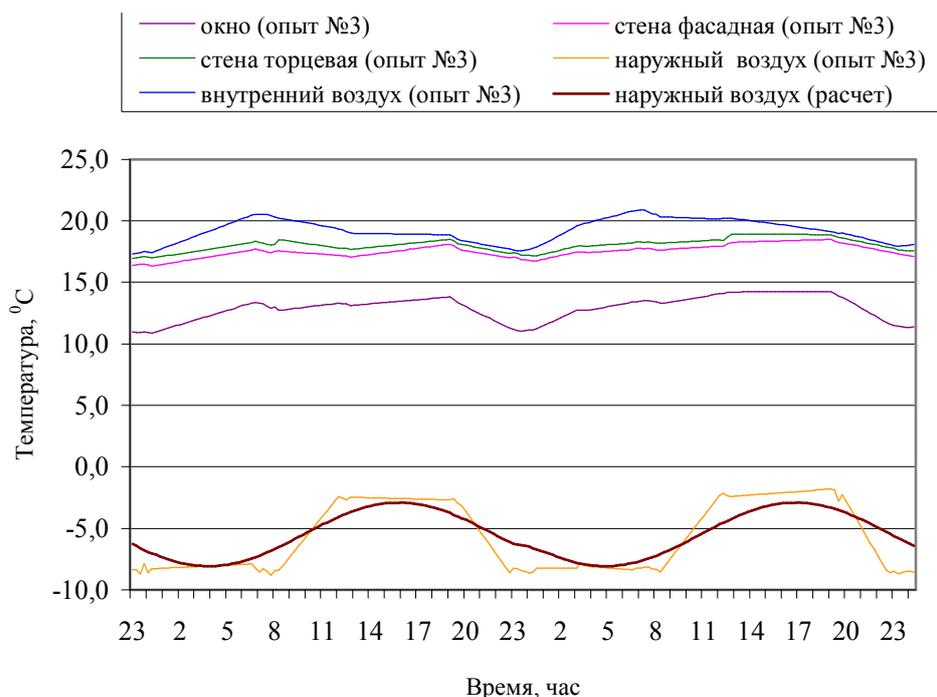


Рисунок 3 - Температуры наружных ограждений и воздуха, (эксперимент при $t_n = -5,5^{\circ}\text{C}$ с амплитудой $2,6^{\circ}\text{C}$)

Анализ экспериментальных кривых, определяющих в опыте (см. рис. тот же) изменение текущих температур внутренних поверхностей наружных ограждений помещения, показывает, что эти температуры практически всегда ниже температуры внутреннего воздуха. При этом перепад температур между внутренним воздухом и поверхностью стен и соответственно тепловые потоки к стенам (рис. 4) в процессе зарядки пола и увеличения его температуры возрастают. В то же время анализ показаний термодатчиков, размещенных на наружной поверхности этих стен (данные не приводятся), показал, что перепад температур между стенами и наружным воздухом и соответственно тепловые потери стен в окружающую среду остаются практически постоянными. Это дает основание для важного вывода о том, что если наружные стены «теплые», то все внутренние изменения теплового состояния помещения при переходе на аккумуляционно-прерывистое отопление практически не влияют на величину тепловых потерь здания в окружающую среду. Поэтому имеющее место повышение тепловых потоков к стенам в период зарядки электропола способствует уменьшению тепловых потоков к стенам в период его разрядки, таким образом, сглаживает колебания температуры воздуха внутри помещения.

Учитывая колебания температур наружного воздуха, следует отметить высокую теплоустойчивость наружных ограждений и помещения в целом этим колебаниям. Понятно, что имеет место влияние суточных колебаний температуры наружного воздуха на тепловые потери через наружные ограждения (классическая постановка задачи теплоустойчивости зданий), так как в ночной период максимальная температура поверхности пола и минимальная температура наружного воздуха совпадают по времени, создавая повышенный температурный напор. Однако сравнение экспериментальных данных по температурам наружных ограждений в опыте с постоянной температурой наружного воздуха и в опыте с амплитудой колебаний более 5°C не выявило заметного влияния колебаний наружной температуры на измеренные значения температуры поверхности наружных ограждений. Это указывает на достаточно высокую теплоустойчивость исследуемой модели помещения, сглаживающую влияние резких колебаний погодных условий на внутренний климат в помещении, что способствует стабильной работе систем автоматического регулирования работы электропола.

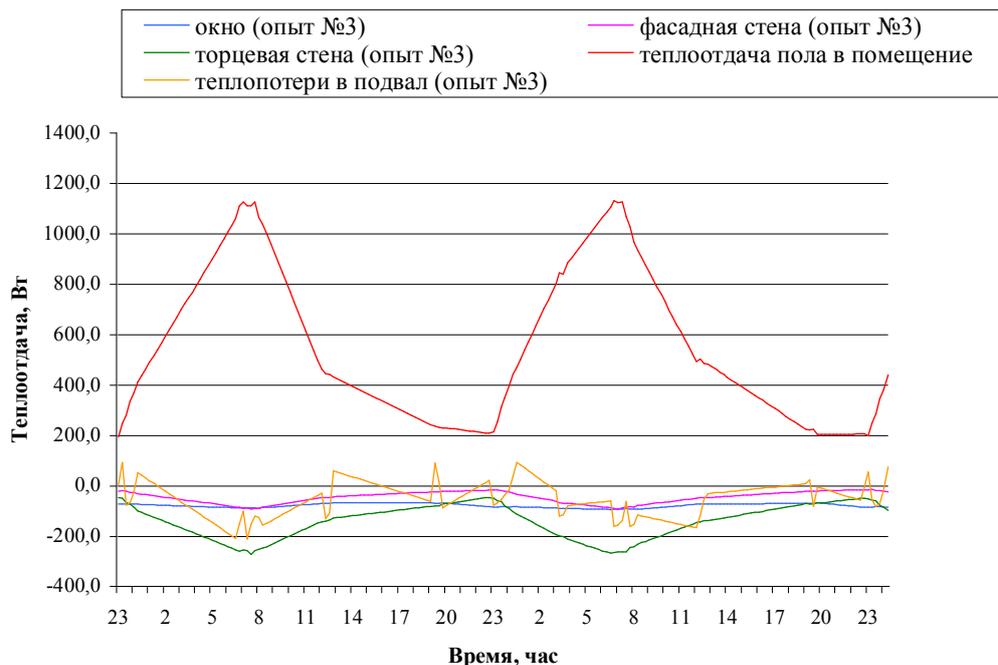


Рисунок 4 - Теплоотдача пола и наружных ограждений (эксперимент при $t_{н} = -5,5^{\circ}\text{C}$ с амплитудой $2,6^{\circ}\text{C}$)

Таким образом, в помещении с электрической кабельной системой отопления, работающей в теплоаккумуляционном режиме, в процессе теплообмена принимает участие не только электропол, но и ограждения помещения, в том числе и наружные стены, которые способствуют уменьшению амплитуды колебания внутреннего воздуха. Полученные уравнения (14)-(15) температур внутренних поверхностей наружных трехслойных стен вошли в полную систему 12 алгебраических уравнений теплового режима помещения с электрической кабельной системой отопления теплоаккумуляционного действия. Систему этих уравнений в окончательном виде представим в отдельной статье.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нормативы сопротивления теплопередаче наружных ограждающих конструкций зданий, строящихся и реконструируемых на Украине, и комплексные мероприятия для их реализации. Тема №53-Б/93: Отчет. - КиевЗНИИЭП, 1993.
2. Шульга Ю.І., Розинський Д.Й., Шевельов В.Б., Черних Л.Ф., Круковський П.Г., Тимченко М.П., Громадський Ю.С. Електротеплоаккумуляційний напрямок розвитку сучасних систем опалення в Україні // Будівництво України. - 2002. - №1. - С. 44-47.
3. Расчетно-аналитические и экспериментальные исследования теплофизических характеристик модели помещения типового жилого здания, оборудованного «теплым полом»: Отчет о НИР №35н/2000 (заключительный), Украинский зональный научно-исследовательский и проектный институт по гражданскому строительству (КиевЗНИИЭП). NIP 0101U007318. - Киев, 2002. - 271 с.
4. Черных Л.Ф. Метод расчета нестационарной теплопередачи через наружные ограждающие конструкции с учетом зависимости их теплофизических характеристик от температуры: Дис. канд. тех. наук. - М., 1984. -134 с.
5. Черных Л.Ф. Сочетание метода малого параметра и конечных интегральных преобразований для задач теплопроводности // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. - 1991. - №1. - С. 146-162.
6. Драганов Б.Х., Черных Л.Ф., Ферг А.Р. Методика расчета теплового режима наружных ограждающих конструкций сельскохозяйственных зданий.- Киев: УСХА, 1991. -126 с.
7. Шевельов В.Б., Розинський Д.Й., Черних Л.Ф., Польовий П.П. Експериментальні дослідження натурної моделі житлового приміщення, обладнаного ЕКСО / Будівництво України. - 2002. - №3. - С. 16-20.
8. Богословский В.Н. Строительная теплофизика.-М.: Высшая школа, 1982. -415 с.

Поступила в редакцию 10 марта 2004 г.