

## РАСЧЕТ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ПОМЕЩЕНИЯ С ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ КАБЕЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ

*Л.Ф. Черных, канд. техн. наук*  
*КиевЗНИИЭП*

При использовании в жилых зданиях электрической кабельной системы отопления греющим полом с теплоаккумулирующим эффектом ЭКСО-ТА в аккумулировании тепловой энергии при «зарядке» дешевой ночной электроэнергией участвует не только сам пол, но и стены, потолок и мебель помещений. Это своеобразие является следствием того, что ЭКСО-ТА, в отличие от традиционной водяной конвективной системы отопления, является лучисто-конвективной системой. При этом меньше половины теплоты от пола к воздуху помещения передается непосредственно конвекцией, а больше половины - на стены и другие предметы помещения - излучением, нагревая их. Затем аккумулированная в них теплота расходуется на нагрев внутреннего воздуха и компенсацию тепловых потерь помещения. В расчетах помещения с электрополом необходимо подобрать такую конструкцию пола и такой режим его работы, чтобы при заданной теплоустойчивости помещения и прерывистом графике «зарядки» пола в данном помещении не создавались бы отклонения от нормы тех параметров, от которых зависит комфорт человека: необходимо, чтобы температура электропола не превышала бы допустимой по санитарным нормам, а амплитуда колебаний температуры внутреннего воздуха была бы минимальной. Для этого в каждом конкретном случае нужно выполнить оптимизационную серию расчетов теплового состояния помещения при задаваемых конструкциях и режимах работы электропола, а для его внедрения в практику строительства и для создания нормативно-технической базы необходимы фундаментальные исследования и разработка инженерной методики расчета теплового режима помещений жилых зданий с ЭКСО – ТА.

Такие теоретические и экспериментальные исследования теплового режима помещения с ЭКСО-ТА проведены в КиевЗНИИЭП [1]. Методом конечных интегральных преобразований, разработанным в КиевЗНИИЭП, аналитически решена задача расчета теплового режима помещения с ЭКСО-ТА греющим полом с однослойными стенами (рис. 1) [2-4]. В результате получена система семи интегральных уравнений внутренних поверхностей помещения и восьмого интегро-дифференциального уравнения теплового баланса внутреннего воздуха, которая численным методом [2-4] замены интегралов конечными суммами с применением квадратурных формул Ньютона-Котесса сведена к системе восьми алгебраических уравнений. Эта система решена методом Гаусса по стандартным программам.

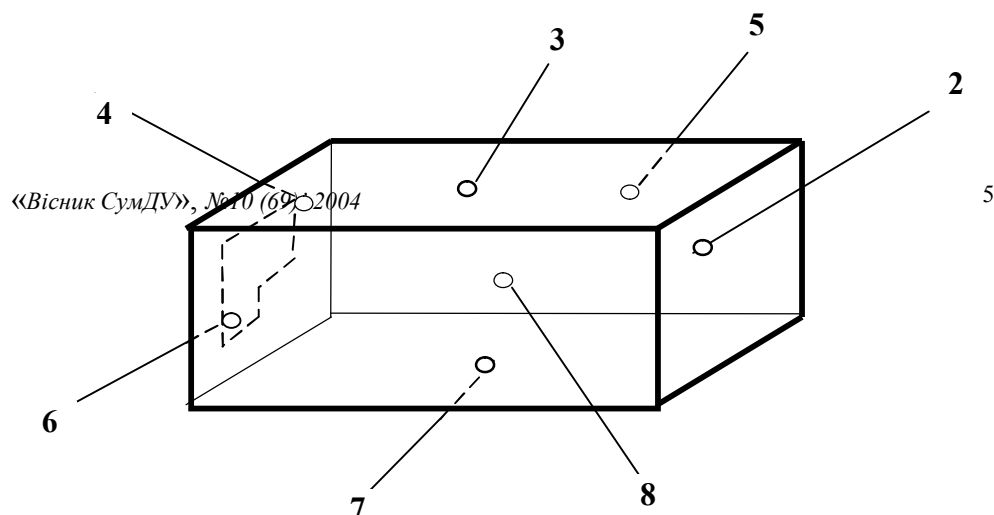


Рисунок 1 - Расчетная схема помещения:

- 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

В целях экономии энергоресурсов однослойные наружные стены заменяются на трехслойные (рис. 2). При этом в жилых многоэтажных зданиях рассматривается худший вариант помещения - типовое угловое помещение с наружной фасадной стеной с окном и торцевой глухой. Тогда к полученной системе из 8 уравнений для двух трехслойных наружных стен добавляются еще две системы двух уравнений тепловых потоков в местах контакта слоев двух наружных трехслойных стен - получается система из 12 уравнений.

Первые три уравнения внутренних однослойных стен ( $i=1-2$ ) и потолка ( $i=3$ ) остаются прежними, как и в случае помещения со всеми однослойными стенами. При этом коэффициенты при неизвестных тепловых потоках будут нулевыми.

Укажем, что запись системы 12 уравнений производим в строгом порядке расположения 12 неизвестных:  $t_1, t_2, t_3, \psi_{1/4}, \psi_{2/4}, t_4, \psi_{1/5}, \psi_{2/5}, t_5, t_6, t_7, t_{cp}$  и свободных членов:  $M_1, M_2, M_3, M_{4/\psi_1}, M_{4/\psi_2}, M_{4/3}, M_{5/\psi_1}, M_{5/\psi_2}, M_{5/3}, M_6, M_7, M_{8/3}$ .

$$\begin{cases}
+ 1 \cdot t_1 - N_1 \cdot F_2 \cdot t_2 - N_1 \cdot F_3 \cdot t_3 + 0 \cdot \psi_{1/4} + 0 \cdot \psi_{2/4} - N_1 \cdot F_4 \cdot t_4 + 0 \cdot \psi_{1/5} + 0 \cdot \psi_{2/5} - N_1 \cdot F_5 \cdot t_5 - N_1 \cdot F_6 \cdot t_6 - N_1 \cdot F_7 \cdot t_7 - K_1 t_{cp} = M_1; \\
- N_2 \cdot F_1 \cdot t_1 + 1 \cdot t_2 - N_2 \cdot F_3 \cdot t_3 + 0 \cdot \psi_{1/4} + 0 \cdot \psi_{2/4} - N_2 \cdot F_4 \cdot t_4 + 0 \cdot \psi_{1/5} + 0 \cdot \psi_{2/5} - N_2 \cdot F_5 \cdot t_5 - N_2 \cdot F_6 \cdot t_6 - N_2 \cdot F_7 \cdot t_7 - K_2 t_{cp} = M_2; \\
- N_3 \cdot F_1 \cdot t_1 - N_3 \cdot F_2 \cdot t_2 + 1 \cdot t_3 + 0 \cdot \psi_{1/4} + 0 \cdot \psi_{2/4} - N_3 \cdot F_4 \cdot t_4 + 0 \cdot \psi_{1/5} + 0 \cdot \psi_{2/5} - N_3 \cdot F_5 \cdot t_5 - N_3 \cdot F_6 \cdot t_6 - N_3 \cdot F_7 \cdot t_7 - K_3 t_{cp} = M_3; \\
- p'_4 Z_{2/4} F_1 t_1 - p'_4 Z_{2/4} F_2 t_2 - p'_4 Z_{2/4} F_3 t_3 + 1 \cdot \psi_{1/4} + 0 \cdot \psi_{2/4} + 0 \cdot t_4 + 0 \cdot \psi_{1/5} + 0 \cdot \psi_{2/5} - p'_4 Z_{2/4} F_5 t_5 - p'_4 Z_{2/4} F_6 t_6 - p'_4 Z_{2/4} F_7 t_7 - K_{4/R_2} Z_{2/4} t_{cp} = M_{4/\psi_1}; \\
+ p'_4 Z_{1/4} F_1 t_1 + p'_4 Z_{1/4} F_2 t_2 + p'_4 Z_{1/4} F_3 t_3 + 0 \cdot \psi_{1/4} + 1 \cdot \psi_{2/4} + 0 \cdot t_4 + 0 \cdot \psi_{1/5} + 0 \cdot \psi_{2/5} + p'_4 Z_{1/4} F_5 t_5 + p'_4 Z_{1/4} F_6 t_6 + p'_4 Z_{1/4} F_7 t_7 + K_{4/R_2} Z_{1/4} t_{cp} = M_{4/\psi_2}; \\
- N_{4/3} F_1 t_1 - N_{4/3} F_2 t_2 - N_{4/3} F_3 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} F_5 t_5 - N_{4/3} F_6 t_6 - N_{4/3} F_7 t_7 - K_{4/3} t_{cp} = M_{4/3}; \\
- p'_5 Z_{2/5} F_1 t_1 - p'_5 Z_{2/5} F_2 t_2 - p'_5 Z_{2/5} F_3 t_3 + 0 \cdot \psi_{1/4} + 0 \cdot \psi_{2/4} - p'_5 Z_{2/5} F_4 t_4 + 1 \cdot \psi_{1/5} + 0 \cdot \psi_{2/5} + 0 \cdot t_5 - p'_5 Z_{2/5} F_6 t_6 - p'_5 Z_{2/5} F_7 t_7 - K_{5/R_2} Z_{2/5} t_{cp} = M_{5/\psi_1}; \\
+ p'_5 Z_{1/5} F_1 t_1 + p'_5 Z_{1/5} F_2 t_2 + p'_5 Z_{1/5} F_3 t_3 + 0 \cdot \psi_{1/4} + 0 \cdot \psi_{2/4} + p'_5 Z_{1/5} F_4 t_4 + 0 \cdot \psi_{1/5} + 1 \cdot \psi_{2/5} + 0 \cdot t_5 + p'_5 Z_{1/5} F_6 t_6 + p'_5 Z_{1/5} F_7 t_7 + K_{5/R_2} Z_{1/5} t_{cp} = M_{5/\psi_2}; \\
- N_{5/3} \cdot F_1 \cdot t_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}; \\
- N_6 \cdot F_1 \cdot t_1 - N_6 \cdot F_2 \cdot t_2 - N_6 \cdot F_3 \cdot t_3 + 0 \cdot \psi_{1/4} + 0 \cdot \psi_{2/4} - N_6 \cdot F_4 \cdot t_4 + 0 \cdot \psi_{1/5} + 0 \cdot \psi_{2/5} - N_6 \cdot F_5 \cdot t_5 + 1 \cdot t_6 - N_6 \cdot F_7 \cdot t_7 - K_6 \cdot t_{cp} = M_6; \\
- N_7 \cdot F_1 \cdot t_1 - N_7 \cdot F_2 \cdot t_2 - N_7 \cdot F_3 \cdot t_3 + 0 \cdot \psi_{1/4} + 0 \cdot \psi_{2/4} - N_7 \cdot F_4 \cdot t_4 + 0 \cdot \psi_{1/5} + 0 \cdot \psi_{2/5} - N_7 \cdot F_5 \cdot t_5 + N_7 \cdot F_6 \cdot t_6 + 1 \cdot t_7 - K_7 \cdot t_{cp} = M_7; \\
- T'_1 \cdot F_1 \cdot t_1 - T'_2 \cdot F_2 \cdot t_2 - T'_3 \cdot F_3 \cdot t_3 + 0 \cdot \psi_{1/4} + S_4 \cdot \psi_{2/4} - T'_4 \cdot F_4 \cdot t_4 + 0 \cdot \psi_{1/5} + S_5 \cdot \psi_{2/5} - T'_5 \cdot F_5 \cdot t_5 - T'_6 \cdot F_6 \cdot t_6 - T'_7 \cdot F_7 \cdot t_7 + 1 \cdot t_{cp} = M_{8/3}
\end{cases}$$

$$\begin{aligned}
 &+1 \cdot t_1 - N_1 \cdot F_2 \cdot t_2 - N_1 \cdot F_3 \cdot t_3 + 0 \cdot \psi_{1/4} + 0 \cdot \psi_{2/4} - \\
 &-N_1 \cdot F_4 \cdot t_4 + 0 \cdot \psi_{1/5} + 0 \cdot \psi_{2/5} - N_1 \cdot F_5 \cdot t_5 - N_1 \cdot F_6 \cdot t_6 - \\
 &-N_1 \cdot F_7 \cdot t_7 - K_1 t_{cp} = M_1;
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
 &-N_2 \cdot F_1 \cdot t_1 + 1 \cdot t_2 - N_2 \cdot F_3 \cdot t_3 + 0 \cdot \psi_{1/4} + 0 \cdot \psi_{2/4} - \\
 &-N_2 \cdot F_4 \cdot t_4 + 0 \cdot \psi_{1/5} + 0 \cdot \psi_{2/5} - N_2 \cdot F_5 \cdot t_5 - \\
 &-N_2 \cdot F_6 \cdot t_6 - N_2 \cdot F_7 \cdot t_7 - K_2 t_{cp} = M_2;
 \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
 &-N_3 \cdot F_1 \cdot t_1 - N_3 \cdot F_2 \cdot t_2 + 1 \cdot t_3 + 0 \cdot \psi_{1/4} + 0 \cdot \psi_{2/4} - \\
 &N_3 \cdot F_4 \cdot t_4 + 0 \cdot \psi_{1/5} + 0 \cdot \psi_{2/5} - N_3 \cdot F_5 \cdot t_5 - \\
 &-N_3 \cdot F_6 \cdot t_6 - N_3 \cdot F_7 \cdot t_7 - K_3 t_{cp} = M_3.
 \end{aligned} \tag{3}$$

Система двух уравнений тепловых потоков  $\psi_{1/4}(\tau)$ ,  $\psi_{2/4}(\tau)$  в местах контакта первого и второго слоев (рис. 2) трехслойной фасадной стены  $i=4$  будет иметь вид

$$\begin{aligned}
 &-p'_4 Z_{2/4} F_1 t_1 - p'_4 Z_{2/4} F_2 t_2 - p'_4 Z_{2/4} F_3 t_3 + 1 \cdot \psi_{1/4} + \\
 &+ 0 \cdot \psi_{2/4} + 0 \cdot t_4 + 0 \cdot \psi_{1/5} + 0 \cdot \psi_{2/5} - p'_4 Z_{2/4} F_5 t_5 - \\
 &-p'_4 Z_{2/4} F_6 t_6 - p'_4 Z_{2/4} F_7 t_7 - K_{4/R_2} Z_{2/4} t_{cp} = M_{4/\psi_1};
 \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned}
 &+p'_4 Z_{1/4} F_1 t_1 + p'_4 Z_{1/4} F_2 t_2 + p'_4 Z_{1/4} F_3 t_3 + 0 \cdot \psi_{1/4} + \\
 &+ 1 \cdot \psi_{2/4} + 0 \cdot t_4 + 0 \cdot \psi_{1/5} + 0 \cdot \psi_{2/5} + p'_4 Z_{1/4} F_5 t_5 + \\
 &+ p'_4 Z_{1/4} F_6 t_6 + p'_4 Z_{1/4} F_7 t_7 + K_{4/R_2} Z_{1/4} t_{cp} = M_{4/\psi_2}.
 \end{aligned} \tag{5}$$

Температура внутренней поверхности этой фасадной  $i=4$  наружной стены с учетом теплового потока в месте контакта среднего слоя со слоем со стороны помещения  $\psi_{2/4}(\tau)$  представится в виде, изображенном на рисунке 2.

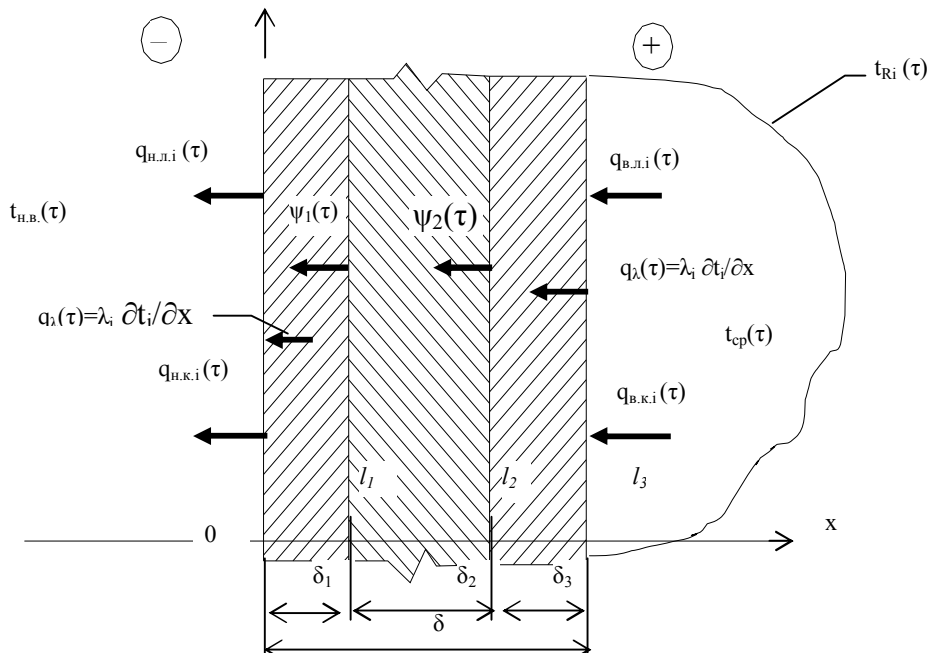


Рисунок 2 - Расчетная схема теплопередачи через трехслойную наружную стену при граничных условиях III рода

Температура внутренней поверхности этой фасадной  $i=4$  наружной стены с учетом теплового потока в месте контакта среднего слоя со слоем со стороны помещения  $\psi_{2/4}(\tau)$  представится в виде

$$\begin{aligned} & -N_{4/3}F_1t_1 - N_{4/3}F_2t_2 - N_{4/3}F_3t_3 + 0 \cdot \psi_{1/4} + \\ & + Y_{2/4} \cdot \psi_{2/4} + 1 \cdot t_4 + 0 \cdot \psi_{1/5} + 0 \cdot \psi_{2/5} - \\ & -N_{4/3}F_5t_5 - N_{4/3}F_6t_6 - N_{4/3}F_7t_7 - K_{4/3}t_{cp} = M_{4/3}. \end{aligned} \quad (6)$$

Аналогично, для торцевой  $i=5$  наружной стены система 2 уравнений тепловых потоков в местах контактов слоев  $\psi_{1/5}(\tau)$  и  $\psi_{2/5}(\tau)$  запишется следующим образом

$$\begin{aligned} & -\rho'_5 Z_{2/5} F_1 t_1 - \rho'_5 Z_{2/5} F_2 t_2 - \rho'_5 Z_{2/5} F_3 t_3 + 0 \cdot \psi_{1/4} + \\ & + 0 \cdot \psi_{2/4} - \rho'_5 Z_{2/5} F_4 t_4 + 1 \cdot \psi_{1/5} + 0 \cdot \psi_{2/5} + 0 \cdot t_5 - \\ & -\rho'_5 Z_{2/5} F_6 t_6 - \rho'_5 Z_{2/5} F_7 t_7 - K_{5/R_2} Z_{2/5} t_{cp} = M_{5/\psi_1}; \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & +\rho'_5 Z_{1/5} F_1 t_1 + \rho'_5 Z_{1/5} F_2 t_2 + \rho'_5 Z_{1/5} F_3 t_3 + 0 \cdot \psi_{1/4} + \\ & + 0 \cdot \psi_{2/4} + \rho'_5 Z_{1/5} F_4 t_4 + 0 \cdot \psi_{1/5} + 1 \cdot \psi_{2/5} + 0 \cdot t_5 + \\ & +\rho'_5 Z_{1/5} F_6 t_6 + \rho'_5 Z_{1/5} F_7 t_7 + K_{5/R_2} Z_{1/5} t_{cp} = M_{5/\psi_2}; \end{aligned} \quad (8)$$

а само уравнение внутренней поверхности этой торцевой  $i=5$  стены примет вид

$$\begin{aligned} & -N_{5/3}F_1t_1 - N_{5/3}F_2t_2 - N_{5/3}F_3t_3 + 0 \cdot \psi_{1/4} + \\ & + 0 \cdot \psi_{2/4} - N_{5/3}F_4t_4 + 0 \cdot \psi_{1/5} + Y_{2/5}\psi_{2/5} + \\ & + 1 \cdot t_5 - N_{5/3}F_6t_6 - N_{5/3}F_7t_7 - K_{5/3}t_{cp} = M_{5/3}. \end{aligned} \quad (9)$$

Уравнения температуры поверхности окна  $i=6$  и электропола  $i=7$  остаются теми же, что и для однослойных стен, также с добавлением потоков с нулевыми коэффициентами.

$$\begin{aligned} & -N_6 \cdot F_1 \cdot t_1 - N_6 \cdot F_2 \cdot t_2 - N_6 \cdot F_3 \cdot t_3 + 0 \cdot \psi_{1/4} + \\ & + 0 \cdot \psi_{2/4} - N_6 \cdot F_4 \cdot t_4 + 0 \cdot \psi_{1/5} + 0 \cdot \psi_{2/5} - \\ & -N_6 \cdot F_5 \cdot t_5 + 1 \cdot t_6 - N_6 \cdot F_7 \cdot t_7 - K_6 \cdot t_{cp} = M_6; \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} & -N_7 \cdot F_1 \cdot t_1 - N_7 \cdot F_2 \cdot t_2 - N_7 \cdot F_3 \cdot t_3 + 0 \cdot \psi_{1/4} + \\ & + 0 \cdot \psi_{2/4} - N_7 \cdot F_4 \cdot t_4 + 0 \cdot \psi_{1/5} + 0 \cdot \psi_{2/5} - \\ & -N_7 \cdot F_5 \cdot t_5 + N_7 \cdot F_6 \cdot t_6 + 1 \cdot t_7 - K_7 \cdot t_{cp} = M_7. \end{aligned} \quad (11)$$

С наличием трехслойных стен значительно уменьшаются теплопотери через них, и поэтому изменения коснутся также уравнения теплового баланса внутреннего воздуха, которое будет иметь вид

$$\begin{aligned} & -T'_1 \cdot F_1 \cdot t_1 - T'_2 \cdot F_2 \cdot t_2 - T'_3 \cdot F_3 \cdot t_3 + 0 \cdot \psi_{1/4} + \\ & + S_{3/4} \cdot \psi_{2/4} - T'_4 \cdot F_4 \cdot t_4 + 0 \cdot \psi_{1/5} + S_{3/5} \cdot \psi_{2/5} - \\ & -T'_5 \cdot F_5 \cdot t_5 - T'_6 \cdot F_6 \cdot t_6 - T'_7 \cdot F_7 \cdot t_7 + 1 \cdot t_{cp} = M_{8/3}. \end{aligned} \quad (12)$$

Отметим, что во всех 12 уравнениях (1) - (12) используются обозначения согласно [1].

Таким образом, задача расчета теплового режима помещения с заменой двух однослойных стен на трехслойные с электрической кабельной системой отопления греющим полом, работающей в теплоаккумуляционном режиме – ЭКСО-ТА, сведена нами к системе

12 алгебраических уравнений, которая решена известным методом Гаусса по стандартным программам. Составлена программа расчета для компьютера «Тепловой режим помещения с электрополом, работающим в аккумуляционно-прерывистом режиме, и с трехслойными наружными конструкциями».

#### АНАЛИЗ РЕШЕНИЯ

Полученную систему 12 алгебраических уравнений (1)-(12) представим в матричном виде на отдельной следующей странице. Из анализа этой системы видно, что она имеет единичную диагональ при неизвестных  $t_1, t_2, t_3, \psi_{1/4}, \psi_{2/4}, t_4, \psi_{1/5}, \psi_{2/5}, t_5, t_6, t_7, t_8$ . Достоверность решения этой системы, а значит, и всей разработанной методики расчета подтверждена экспериментальными данными, полученными при лабораторных испытаниях объемного блока жилого помещения с трехслойными наружными стенами и с ЭКСО-ТА греющим полом в климатическом комплексе КиевЗНИИЭП [5] при

температуре наружного воздуха  $t_n = -24^\circ\text{C}$ . Максимальное расхождение экспериментальных (кривые 1,3) и рассчитанных (кривые 2,4) по методике КиевЗНИИЭП данных как по температуре воздуха в помещении, так и по температуре пола (рис. 3) и наружных стен (рис. 4, кривые 1,2) не превышает 10%, а среднее расхождение составляет 6,1%, что можно считать достаточно высоким показателем для исследований такого типа.

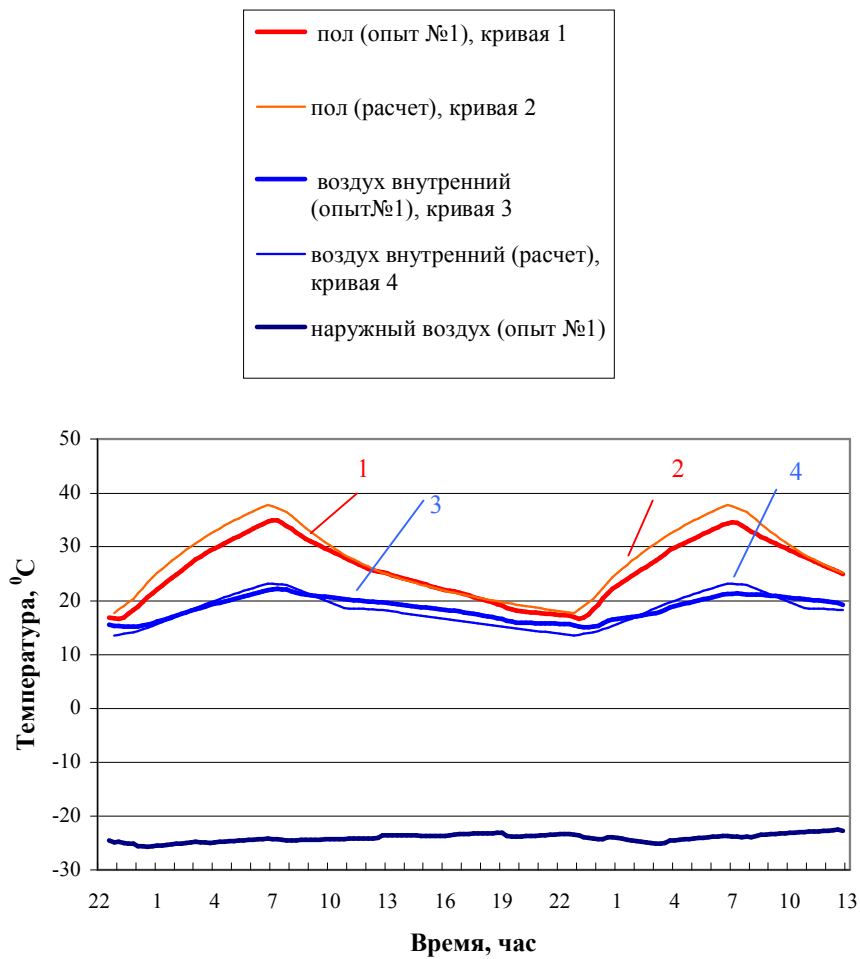


Рисунок 3 - Температуры пола и воздуха  
(эксперимент при  $t_n = -24^\circ\text{C}$ , сопоставление с расчетом)

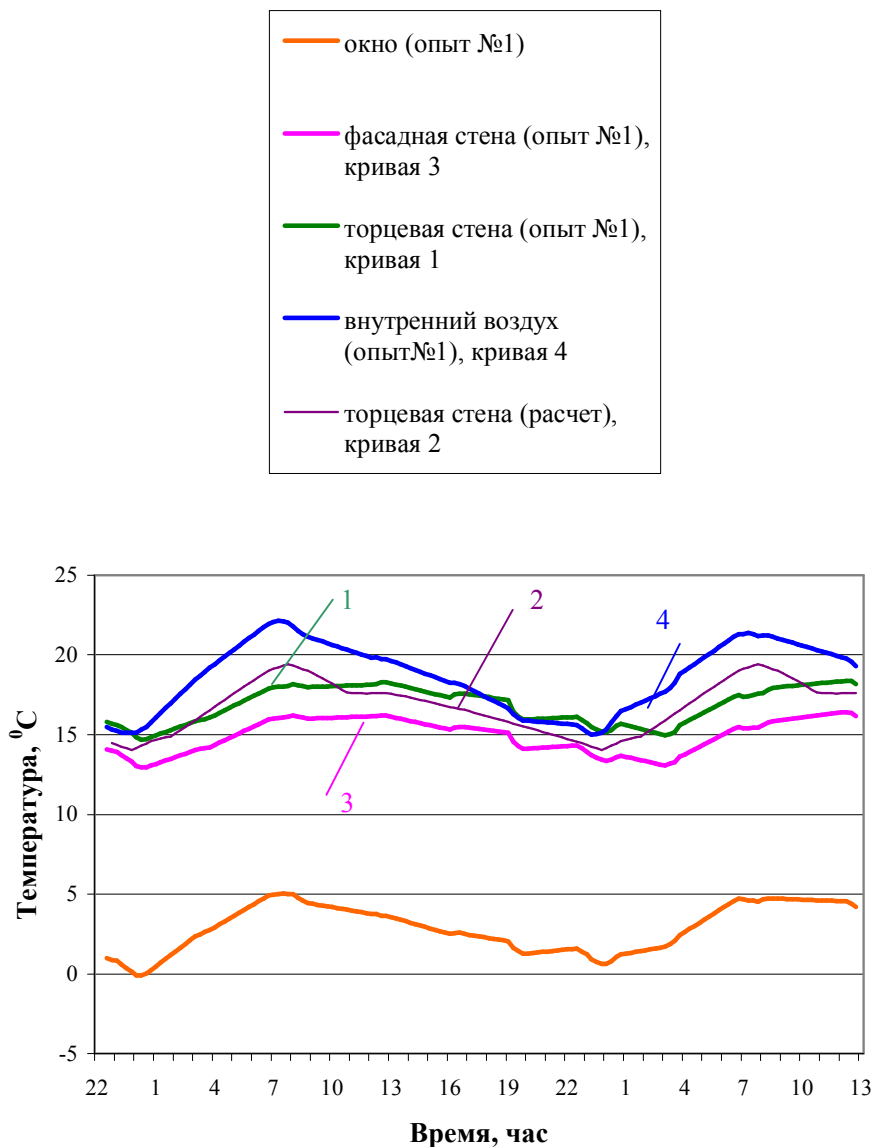


Рисунок 4 - Температуры наружных ограждений и воздуха помещения (эксперимент при  $t_{н} = -24^{\circ}\text{C}$ , сопоставление с расчетом)

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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); НГР 0101U007318. - Киев. 2002 г. - 271 с.
2. 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.
3. Драганов Б.Х., Черных Л.Ф., Ферг А.Р. Методика расчета теплового режима наружных ограждающих конструкций сельскохозяйственных зданий.- Киев: УСХА, 1991. -126 с.
4. 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.
5. 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.

Поступила в редколлегию 10 марта 2004г.