

УДК 697.1

ФИАЛКО Н.М.<sup>1</sup>, ЧЕРНЫХ Л.Ф.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ин-т технической теплофизики НАН Украины

<sup>2</sup> Украинский зональный научно-исследовательский и проектный институт по гражданскому строительству (КиевЗНИИЭП)

## ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ ТРЕХСЛОЙНЫХ НАРУЖНЫХ СТЕН ПОМЕЩЕНИЯ ПРИ НАПОЛЬНОМ ЭЛЕКТРОТЕПЛОАККУМУЛЯЦИОННОМ ОТОПЛЕНИИ

Методом кінцевих інтегральних перетворювань визначено температури в кожному шарі тришарових зовнішніх стін приміщення з теплоаккумуляційною електричною кабельною системою опалення підлогою, що гріє, та визначено тепловтрати через них.

Методом конечных интегральных преобразований определены температуры в каждом слое трехслойных наружных стен помещения с теплоаккумуляционной электрической кабельной системой отопления греющим полом и определены тепловтрати через них.

By the finite integral conversion method the temperature was determined in each layer of the 3-layered external walls for the premise with the heat accumulating electric cable system of heating by the floor, which warms and the heat losses were determined through them.

$a$  – коэффициент температуропроводности материала;

$c$  – удельная теплоемкость;

$C_0$  – коэффициент излучения абсолютного черного тела;

$F$  – площадь конструкции;

$h$  – относительный коэффициент конвективной теплоотдачи поверхности воздуху (лучистого теплообмена поверхности с другими поверхностями, безразмерная величина);

$q$  – плотность теплового потока;

$R$  – контактное сопротивление;

$t$  – температура;

$T$  – период процесса;

$V$  – объем воздуха в помещении;

$x$  – текущая координата.

$\alpha$  – коэффициент конвективной теплоотдачи поверхности воздуху, коэффициент лучистого теплообмена поверхности с другими поверхностями;

$\delta$  – толщина конструкции;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала конструкции;

$\rho$  – плотность;

$\tau$  – время;

$\psi$  – плотность теплового потока в местах контакта слоев трехслойной стены;

$\varepsilon$  – степень черноты;

$\varphi$  – коэффициент облученности.

### Индексы:

$i$  – номер конструкции;

$j$  – число членов ряда;

$k$  – номер слоя трехслойной стены;

$R$  – радиационная температура;

$t$  – температура;

$\gamma$  – число членов ряда;

$\psi$  – удельный тепловой поток в месте контакта слоев трехслойной стены;

$v$  – внутренний;

$k$  – конвективный; контактный;

$l$  – лучистый;

$n$  – наружный;

$sp$  – среда (воздух) внутри помещения;

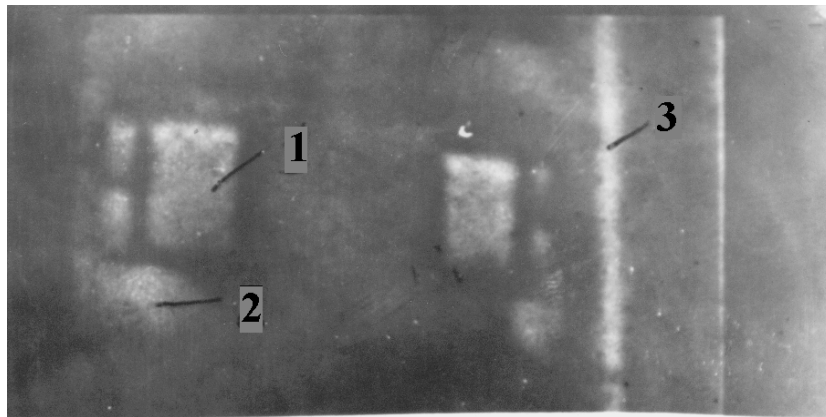
1, 2, 3 – номера слоев, начиная от наружной поверхности трехслойной конструкции;

$pr$  – приведенный.

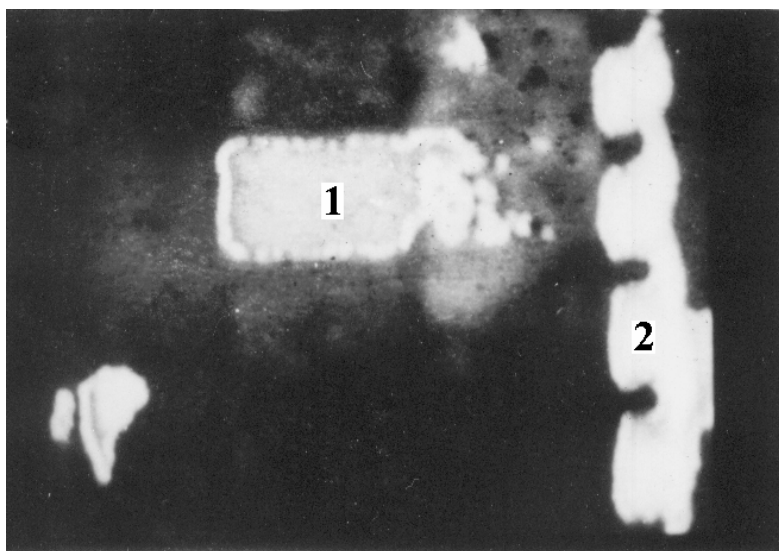
Наружные стены зданий играют, как известно, ведущую роль в формировании теплового режима помещений. Например, для жилого дома серии 96 с традиционным водяным радиаторным отоплением теплопотери через данные стены составляют около 35 %, потери же через окна не превышают 25 %, а через подвальные и чердачные перекрытия – 10 %; при этом на вентиляцию помещения расходуется примерно 30 % располагаемого тепла. Наглядное представление о характере распределения температур на наружных поверхностях указанных стен дают термограммы, приведенные на рис. 1, 2. Здесь светлые зоны отвечают участкам здания с повышенными удельными теплопотеря-

ми. Как видно из рис. 1, эти теплопотери оказываются наибольшими через окна, фрагменты стен за радиаторами, стыки панелей. Пониженные температуры имеют место также на выступающих элементах здания – балконах (см. рис. 2). К тому же возможны случаи, когда зоны с повышенными теплопотерями наблюдаются в местах, соответствующих различным дефектам строительства. Так, рис. 2 иллюстрирует ситуацию, отвечающую наличию в торцевой наружной стене девятиэтажного панельного дома бракованной панели, установленной на 4-м этаже.

Представляет интерес исследование закономерностей влияния наружных стен на формирова-



**Рис. 1. Фрагмент термограммы фасада жилого дома серии 96:**  
1 - окна; 2 - места расположения радиаторов; 3 - вертикальный стык панелей.



**Рис. 2. Термограмма торцевой наружной стены панельного жилого дома серии 134:**  
1 - бракованная панель; 2 - балконы.

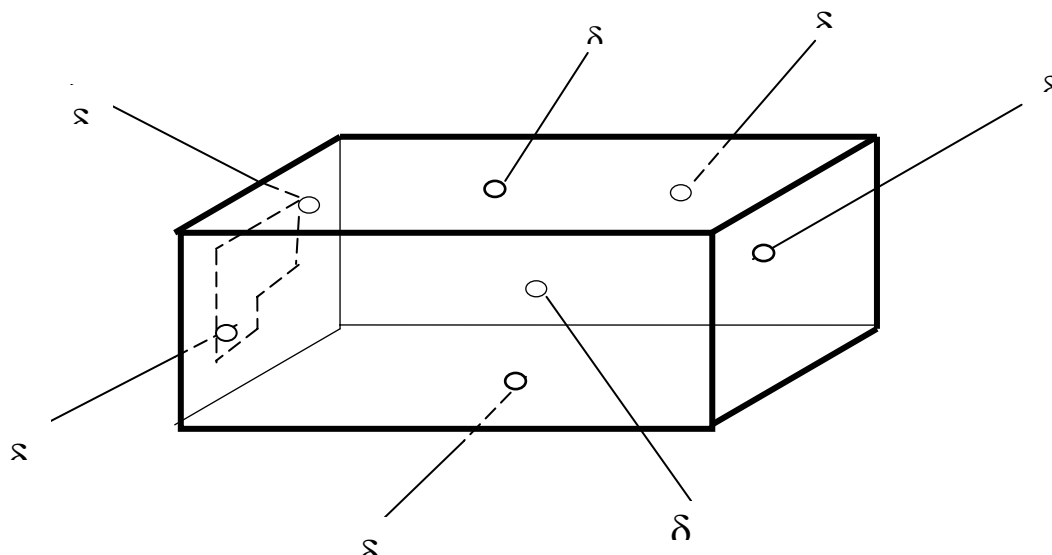
ние теплового состояния помещения при использовании напольного электротеплоаккумуляционного отопления. Данная система отопления, широко используемая за рубежом и получающая все большее распространение в нашей стране, обладает по сравнению с традиционной радиаторной целым рядом достоинств, таких как: обеспечение повышенного уровня тепловой комфортности, возможность быстрого управления температурным режимом помещения либо отдельных его зон, относительно небольшие капитальные затраты при монтаже данной системы, пониженные эксплуатационные затраты за счет использования электроэнергии, отпускаемой в ночные часы по льготному тарифу, и др.

Как очевидно, функции наружных стен в обеспечении требуемого теплового режима помещения в случае напольного электротеплоаккумуляционного отопления должны существенно отличаться от таковых при традиционном радиаторном отоплении. Настоящая статья посвящена, главным образом, исследованию особенностей воздействия наружных стен на тепловое состояние помещения в условиях применения первого из указанных способов отопления. При этом особое внимание уделяется анализу роли данных стен в

стабилизации температуры воздуха помещений.

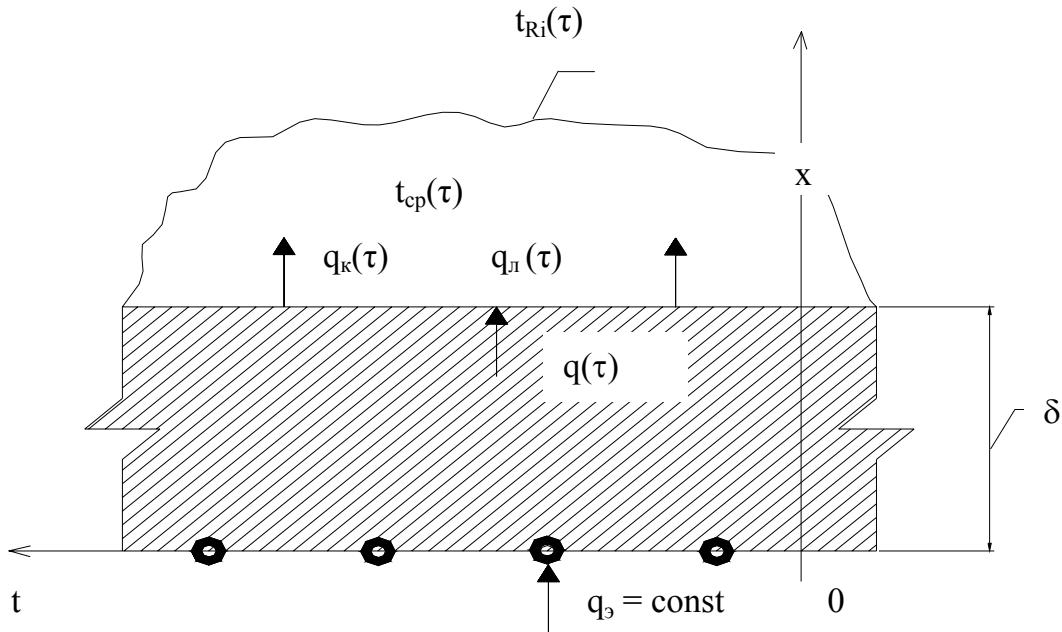
Ниже рассматриваемое угловое помещение промежуточного этажа многоэтажного жилого дома худшее по теплозащите в сравнении с типовым помещением. Если последнее имеет одну наружную фасадную стену с окном, а остальные конструкции - внутренние, то в исследуемом помещении, рис. 3, имеет место вторая наружная торцевая глухая стена. В полу равномерно по площади размещается напольная электрическая кабельная система отопления. Она представляет собой ряд низкотемпературных нагревателей в виде электрических кабелей, уложенных на панель перекрытия и покрытых слоем бетона (рис. 4). Этот слой в тепловом отношении выполняет роль аккумулятора теплоты при включении электронагрева с 23 до 7 часов, когда электроэнергия отпускается по льготному тарифу. Для того, чтобы выделяемая при прохождении электрического тока теплота направлялась преимущественно в обогреваемое помещение, под кабели укладывается слой высокоэффективного теплоизолятора.

Теплообмен в таком помещении с напольной электрической кабельной системой отопления имеет ряд особенностей по сравнению с ситуаци-



**Рис. 3. Расчетная схема помещения.**

**1,2 – внутренние стены, граничащие с другими помещениями данного этажа;  
3 – потолок, граничащий с помещением верхнего этажа; 4 – наружная фасадная стена с окном; 5 – наружная торцевая стена; 6 – окно; 7 – электропол.**



**Рис. 4. Расчетная схема теплообмена греющего пола с помещением.**  
 $q(\tau)$ ,  $q_k(\tau)$ ,  $q_l(\tau)$  - соответственно плотности теплового потока, отводимого от поверхности электропола и его конвективная и лучистая составляющие

ей, отвечающей традиционному радиаторному отоплению. Так, если в последнем случае процесс передачи теплоты от отопительных приборов к внутреннему воздуху происходит в основном путем конвекции (радиационная составляющая теплообмена не превышает 10 %), то в помещении с напольным электроотоплением весьма существенной оказывается доля теплоты, передаваемая от пола к поверхностям ограждений посредством излучения (здесь указанная радиационная составляющая может превышать 50 % общего количества выделяемой теплоты). При этом температуры внутренних поверхностей конструкций в случае радиаторного отопления практически не отличаются от температуры воздуха в помещении; в случае же напольного электроотопления, за счет лучистого теплообмена с полом, их значения заметно превышают уровни температур воздуха. Поэтому последнюю из указанных систем следует отнести не к конвективной, а к лучисто-конвективной, при применении которой тепловой режим помещения определяется не только температурой внутреннего воздуха, как при конвектив-

ном отоплении, но и радиационными температурами помещения относительно всех ограждающих конструкций; в этих условиях значения температур и, соответственно, средние значения лучистой и конвективной составляющей коэффициентов теплоотдачи на разных внутренних поверхностях ограждающих конструкций будут различными по величине.

Прерывистая подача электроэнергии в отопительную систему обуславливает нестационарность процессов теплопереноса в помещении, так называемую «внутреннюю» нестационарность. Очевидно, она сопровождается «внешней» нестационарностью, вызванной суточными колебаниями температуры наружного воздуха.

Перечисленные особенности теплового режима помещения с лучисто-конвективной напольной электрической кабельной системой отопления теплоаккумуляционного действия (ЭКСО-ТА) обусловили приводимую ниже постановку нестационарной одномерной нелинейной задачи теплопереноса для изучаемого объекта. При этом в данной постановке учитывается обычно применяемое

разделение внутренних поверхностей помещения на охлаждающие, нагревающие и нейтральные [1]. Охлаждающими поверхностями исследуемого помещения являются внутренние поверхности двух наружных стен - торцевой глухой и фасадной с окном; к нагревающей относится поверхность электропола, а к нейтральным - поверхности двух внутренних стен и потолка.

Математическая постановка задачи для каждой из этих групп ограждений представима в виде:

- для нейтральных внутренних стен ( $i = 1, 2$ , рис. 3) и потолка ( $i = 3$ )

$$\frac{\partial t_i(x, \tau)}{\partial \tau} = a_i \frac{\partial^2 t_i(x, \tau)}{\partial x^2}; \tau > 0; 0 < x < \delta_i; i = 1, 2, 3; \quad (1)$$

$$t_i(x, 0) = t_{cp}(x, 0) = \text{const}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial t_i(0, \tau)}{\partial x} = 0; \quad (3)$$

$$\frac{\partial t_i(\delta_i, \tau)}{\partial x} + h_{в,и}(\tau) \cdot t_i(\delta_i, \tau) = h_{в,к,и}(\tau) \cdot t_{cp}(\tau) + h_{в,л,и}(\tau) \cdot t_{Ri}(\tau); \quad (4)$$

- для охлаждающих трехслойных ( $k = 1, 2, 3$  - номера слоев) наружных стен ( $i = 4, 5$  - номера стен)

$$\frac{\partial t_{k,i}(x, \tau)}{\partial \tau} = a_{k,i} \frac{\partial^2 t_{k,i}(x, \tau)}{\partial x^2}; \tau > 0; l_{k-1} < x < l_k; k = 1, 2, 3; i = 4, 5; \quad (5)$$

$$t_{k,i}(x, 0) = M_{k,i}x + M_{(k+3),i}; \quad (6)$$

$$-\frac{\partial t_{1,i}(0, \tau)}{\partial x} + h_{н,и}(\tau) \cdot t_{1,i}(0, \tau) = h_{н}(\tau) \cdot t_{н}(\tau); \quad (7)$$

$$\lambda_{k,i} \frac{\partial t_{k,i}(l_{k,i}, \tau)}{\partial x} = \lambda_{(k+1),i} \frac{\partial t_{(k+1),i}(l_{k,i}, \tau)}{\partial x}; k = 1, 2; \quad (8)$$

$$\lambda_{k,i} \frac{\partial t_{k,i}(l_{k,i}, \tau)}{\partial x} = \frac{1}{R_{k,i}} [t_{(k+1),i}(l_{k,i}, \tau) - t_{k,i}(l_{k,i}, \tau)]; \quad (9)$$

$$\frac{\partial t_{3,i}(l_{3,i}, \tau)}{\partial x} + h_{в,3,и}(\tau) \cdot t_{3,i}(l_{3,i}, \tau) = h_{в,к,3,и}(\tau) \cdot t_{cp}(\tau) + h_{в,л,3,и}(\tau) \cdot t_{R3,i}(\tau); \quad (10)$$

- для охлаждающей однослойной наружной конструкции - окна ( $i = 6$ ), основное операторное уравнение идентично (1), а начальное и граничные условия аналогичны (6), (7) и (10);

- для нагревающего пола ( $i = 7$ ) основное операторное уравнение, начальное условие и граничное

условие на поверхности, обращенной в помещение, такие же, как и для нейтральных внутренних стен (см. (1), (2) и (4)). Граничное условие на обогреваемой поверхности слоя бетона, покрывающего электрическую кабельную систему, имеет вид

$$-\lambda_7 \frac{\partial t_7(0, \tau)}{\partial x} = \begin{cases} \frac{T}{m} \cdot q_3 - & \text{при } 23 \text{ ч} < \tau \leq 7 \text{ ч;} \\ 0 & - \text{при } 7 \text{ ч} < \tau \leq 23 \text{ ч.} \end{cases} \quad (11)$$

Здесь  $t_i(x, \tau)$ ,  $t_{к,и}(x, \tau)$  - текущие температуры, осредненные по соответствующим теплоотдающим (теповоспринимающим) поверхностям;  $t_{Ri}(\tau)$  - радиационная температура помещения относительно  $i$ -той поверхности, определяемая как средневзвешенная по площадям  $F_i$  окружающих поверхностей согласно соотношению [1]

$$t_{Ri}(\tau) = \frac{\sum_{j=1}^7 [t_j(\tau) \cdot F_j] - t_i(\tau) \cdot F_i}{\sum_{j=1}^7 F_j - F_i} \quad (12)$$

В начальных условиях (6)  $M_{к,и}$  и  $M_{(к+3),и}$  - численные коэффициенты;  $l_{к,и}$  - координаты, отвечающие местам сопряжения слоев в трехслойных стенах;  $T$  - продолжительность цикла работы электропола, равная суткам;  $m$  - продолжительность нагрева пола.

Температура воздуха помещения, фигурирующая в приведенных выше постановках задач, определяется на основании соответствующего уравнения теплового баланса. При этом принимается во внимание, что нагрев воздуха осуществляется за счет теплоподвода от пола, внутренних стен и потолка, а также за счет бытовых тепловыделений; охлаждение же воздуха происходит в виде отвода теплоты к наружным стенам, окну и воздухообмена с холодным наружным вентиляционным воздухом. Соответственно этому уравнение теплового баланса может быть записано следующим образом

$$Q_{cp}(\tau) = \sum_{i=1}^3 Q_{в,и}(\tau) - \sum_{i=4}^5 Q_{н,и}(\tau) - Q_{ок}(\tau) + Q_3(\tau) + Q_{быт}(\tau) - Q_{вент}(\tau), \quad (13)$$

где  $Q_{cp}(\tau)$  - тепловой поток, идущий на нагрев внутреннего воздуха помещения,

$$Q_{cp}(\tau) = c\rho V \frac{dt_{cp}(\tau)}{d\tau}; \quad (14)$$

$Q_{в,і}(\tau)$  – тепловой поток от внутренних стен и потолка;  $Q_{н,і}(\tau)$  – тепловой поток через наружные стены;  $Q_{ок}(\tau)$  – тепловой поток, отводимый через окно;  $Q_э(\tau)$  – тепловой поток от электропола;  $Q_{быт}(\tau)$  – бытовые тепловыделения

$$Q_{быт}(\tau) = q_{быт}(\tau)F, \quad (15)$$

где  $q_{быт}(\tau)$  – удельные бытовые тепловыделения, приходящиеся на 1 м<sup>2</sup> площади пола;  $Q_{вент}(\tau)$  – тепловой поток, отводимый в результате вентиляционного воздухообмена, который определяется как сумма потоков, уходящих из помещения двумя путями, во-первых, через притворы в окнах (за счет инфильтрации холодного наружного воздуха) в количестве примерно одной трети, во-вторых, через форточки (или в современных окнах через вентиляционные щели или отверстия в рамах и створках окон) в количестве двух третей

$$Q_{вент}(\tau) = (q_{инф} + q_{вент}) [t_{cp}(\tau) - t_n(\tau)], \quad (16)$$

где  $q_{инф}$ ,  $q_{вент}$  – удельные инфильтрационный и вентиляционный тепловые потоки при перепаде температур внутреннего и наружного воздуха в 1 °С,  $q_{инф} = c\rho V_{инф}$ ;  $q_{вент} = c\rho V_{вент}$ ;  $V_{инф}$ ,  $V_{вент}$  – объемные расходы инфильтрационного и вентиляционного воздуха, соответственно;  $t_n(\tau)$  – температура наружного воздуха, определяемая соотношением

$$t_n(\tau) = t_0 - A \cos \frac{2\pi}{T} (\tau - \varphi) \quad (17)$$

Здесь  $t_0$  – среднемесячная суточная температура наружного воздуха для самого холодного зимнего месяца;  $A$  – среднесуточная амплитуда колебаний температуры наружного воздуха для данного месяца;  $\varphi$  – начальная фаза колебаний наружного воздуха;  $T$  – период колебаний температуры наружного воздуха ( $T = 24$  часа).

Для ситуации, отвечающей однослойной ограждающей конструкции, решение поставленной задачи методом конечных интегральных преобразований представлено в [2]. Ниже приводится решение задачи для случая трехслойных наружных стен. Выражения, определяющие температуру соответственно в первом, втором и третьем слое наружных стен, имеют вид

$$t_{1,i}(x, \tau) = \sum_{\gamma=1}^{\infty} P_{\gamma,1,i}(x) \left[ d_{1,\gamma,i} e^{-R_{\gamma,1,i} \tau} + \right. \quad (18)$$

$$\left. + d_{2,\gamma,i} I_{\psi_{1,i},\gamma,1}(\tau) + d_{3,\gamma,i} \cdot I_{t_{н,\gamma}}(\tau) \right];$$

$$t_{2,i}(x, \tau) = M_{60,i} + E_{20,i} \int_0^{\tau} \psi_{2,i}(\omega) d\omega - E_{20,i} \int_0^{\tau} \psi_{1,i}(\omega) d\omega +$$

$$+ \sum_{\gamma=1}^{\infty} \left\{ P_{\gamma,2,i}(x) \left[ d_{4,\gamma,i} e^{-R_{\gamma,2,i} \tau} + d_{5,\gamma,i} I_{\psi_{2,i},\gamma,2}(\tau) - \right. \quad (19)$$

$$\left. - d_{6,i} I_{\psi_{1,i},\gamma,2}(\tau) \right] \right\};$$

$$t_{3,i}(x, \tau) = \sum_{\gamma=1}^{\infty} P_{\gamma,3,i}(x) \left[ A_{k,\gamma,3,i}(\tau) \cdot B_{k,\gamma,3,i}(\tau) \cdot I_{t_{cp,\gamma,3,i}}(\tau) + \right. \quad (20)$$

$$+ A'_{\gamma,3,i}(\tau) \cdot B_{\gamma,3,i}(\tau) \cdot I_{t_{R3,i,\gamma}}(\tau) -$$

$$\left. - d_{70,\gamma,3,i}(\tau) \cdot I_{\psi_{2,i,\gamma,3}}(\tau) + \bar{t}_{\gamma,3,i}(0) e^{-R_{\gamma,3,i}(\tau) \tau} \right],$$

где

$$d_{1,\gamma,i} = \left[ M_{1,i} \frac{\delta_{1,i}}{\mu_{\gamma,1,i}} (1 - \cos \mu_{\gamma,1,i}) + M_{4,i} \sin \mu_{\gamma,1,i} \right] \times$$

$$\times \frac{\delta_{1,i}}{C_{\gamma,1,i} \mu_{\gamma,1,i} \cos^2 \mu_{\gamma,1,i}};$$

$$d_{2,\gamma,i} = \frac{a_{1,i}}{C_{\gamma,1,i} \lambda_{1,i} \cos^2 \mu_{\gamma,1,i}}; \quad d_{3,\gamma,i} = \frac{a_{1,i} h_{н,1,i}}{C_{\gamma,1,i} \cos \mu_{\gamma,1,i}};$$

$$R_{\gamma,1,i} = \frac{\mu_{\gamma,1,i}^2 a_{1,i}}{\delta_{1,i}^2};$$

$$I_{\psi_{1,i},\gamma,1}(\tau) = \int_0^{\tau} \psi_{1,i}(\omega) e^{-R_{\gamma,1,i}(\tau-\omega)} d\omega;$$

$$I_{t_{н}}(\tau) = \int_0^{\tau} t_{н}(\omega) e^{-R_{\gamma,1,i}(\tau-\omega)} d\omega;$$

$$M_{60,i} = \frac{1}{\delta_{2,i}} \left[ M_{2,i} \frac{l_{2,i}^2 - l_{1,i}^2}{2} + M_{5,i} \delta_{2,i} \right];$$

$$d_{4,\gamma,i} = 2M_{2,i} \frac{\delta_{2,i}}{\gamma^2 \pi^2} \left[ (-1)^\gamma - 1 \right];$$

$$d_{5,\gamma,i} = \frac{2a_{2,i}(-1)^\gamma}{\delta_{2,i}\lambda_{2,i}}; \quad d_{6,i} = \frac{2a_{2,i}}{\delta_{2,i}\lambda_{2,i}}; \quad R_{\gamma,2,i} = \frac{\mu_{\gamma,2,i}^2 a_{2,i}}{\delta_{2,i}^2};$$

$$E_{20,i} = \frac{a_{2,i}}{\delta_{2,i}\lambda_{2,i}};$$

$$I_{\psi_{1,i,\gamma,2}}(\tau) = \int_0^\tau \psi_{1,i}(\omega) e^{-R_{\gamma,2,i}(\tau-\omega)} d\omega;$$

$$I_{\psi_{2,i,\gamma,2}}(\tau) = \int_0^\tau \psi_{2,i}(\omega) e^{-R_{\gamma,2,i}(\tau-\omega)} d\omega;$$

$$A_{\kappa,\gamma,3,i}(\tau) = \frac{a_{3,i} h_{\text{в,к},3,i}(\tau)}{C_{\gamma,3,i}(\tau)}; \quad A'_{\text{л},\gamma,3,i}(\tau) = \frac{a_{3,i} h_{\text{в,л},3,i}(\tau)}{C_{\gamma,3,i}(\tau)};$$

$$R_{\gamma,3,i}(\tau) = \frac{\mu_{\gamma,3,i}^2(\tau) a_{3,i}}{\delta_{3,i}^2};$$

$$B_{\text{н},\gamma,3,i}(\tau) = \cos \mu_{\gamma,3,i}(\tau)$$

$$I_{t_{\text{ср},\gamma,3,i}}(\tau) = \int_0^\tau t_{\text{ср}}(\omega) e^{-R_{\gamma,3,i}(\tau)(\tau-\omega)} d\omega;$$

$$I_{t_{R3,i,\gamma}}(\tau) = \int_0^\tau t_{R3,i}(\omega) e^{-R_{\gamma,3,i}(\tau)(\tau-\omega)} d\omega;$$

$$I_{\psi_{2,i,\gamma,3}}(\tau) = \int_0^\tau \psi_{2,i}(\omega) e^{-R_{\gamma,3,i}(\tau)(\tau-\omega)} d\omega;$$

$$d_{70,\gamma,3,i}(\tau) = \frac{a_{3,i}}{C_{\gamma,3,i}(\tau)\lambda_{3,i}};$$

$$\bar{t}_{\gamma,3,i}(0) = \frac{\delta_{3,i}}{C_{\gamma,3,i}(\tau)\mu_{\gamma,3,i}(\tau)} \times$$

$$\times \left\{ M_{3,i} \left[ \frac{\delta_{3,i}}{\mu_{\gamma,3,i}} (\cos \mu_{\gamma,3,i}(\tau) - 1) + l_{3,i} \sin \mu_{\gamma,3,i}(\tau) \right] + \right.$$

$$\left. + M_{4,i} \sin \mu_{\gamma,3,i}(\tau) \right\}.$$

Здесь и ниже приняты следующие обозначения:  $P_{\gamma,\kappa,i}(x)$  – собственные функции задач Штурма-Лиувилля;  $\mu_{\gamma,\kappa,i}$  – собственные числа этих задач;  $C_{\gamma,\kappa,i}$  – нормирующие делители попарно ортогональных собственных функций с весовой функцией;  $\psi_{1,i}(\tau)$  и  $\psi_{2,i}(\tau)$  – плотности тепловых потоков в местах контакта соответственно первого-второго и второго-третьего слоев.

Выражения для указанных тепловых потоков  $\psi_{1,i}(\tau)$  и  $\psi_{2,i}(\tau)$  находим из решения системы двух интегральных уравнений Вольтерра II рода типа свертки

$$\Psi_{m,i}(\tau) = G_{m,i}(\tau) + \int_0^\tau K_{m,i}(\tau-\omega)\Psi_{m,i}(\omega)d\omega \quad (21);$$

$m = 1, 2.$

Температура на внутренней поверхности наружных стен представима в виде

$$t_{3,i}(l_{3,i}, \tau) = \sum_{\gamma=1}^{\infty} \left[ A_{\kappa,\gamma,3,i}(\tau) \cdot B_{\gamma,3,i}^2(\tau) \cdot I_{t_{\text{ср},\gamma,3,i}}(\tau) + \right. \\ \left. + A'_{\text{л},\gamma,3,i}(\tau) \cdot B_{\gamma,3,i}^2(\tau) \cdot I_{t_{R3,i,\gamma}}(\tau) - \right. \\ \left. - d_{70,\gamma,3,i}(\tau) \cdot B_{\gamma,3,i}(\tau) \cdot I_{\psi_{2,i,\gamma}}(\tau) + \right. \\ \left. + \bar{t}_{\gamma,3,i}(0) \cdot B_{\gamma,3,i}(\tau) \cdot e^{-R_{\gamma,3,i}(\tau)\tau} \right]. \quad (22)$$

Суммарный тепловой поток, отводимый через наружные ограждающие конструкции, определяется зависимостью

$$Q_{\text{н},3}(\tau) = \\ = \sum_{i=4}^5 F_i \cdot \alpha_{\text{в,к},3,i}(\tau) \left| \sum_{\gamma=1}^{\infty} \left[ A_{\kappa,\gamma,3,i}(\tau) \cdot B_{\gamma,3,i}^2(\tau) \cdot I_{t_{\text{ср},\gamma,3,i}}(\tau) + \right. \right. \\ \left. \left. + A'_{\text{л},\gamma,3,i}(\tau) \cdot B_{\gamma,3,i}^2(\tau) \cdot I_{t_{R3,i,\gamma}}(\tau) - \right. \right. \\ \left. \left. - d_{70,\gamma,3,i}(\tau) \cdot B_{\gamma,3,i}(\tau) \cdot I_{\psi_{2,i,\gamma,3}}(\tau) + \right. \right. \\ \left. \left. + \bar{t}_{\gamma,3,i}(0) \cdot B_{\gamma,3,i}(\tau) \cdot e^{-R_{\gamma,3,i}(\tau)\tau} \right] - t_{\text{ср}}(\tau) \right|.$$

Входящая в выражения (22), (23) температура воздуха  $t_{\text{ср}}(\tau)$  внутри помещения находилась с учетом уравнения теплового баланса (13) из следующего интегро-дифференциального уравнения

$$\frac{dt_{\text{ср}}(\tau)}{d\tau} = C_1(\tau) \cdot t_{\text{ср}}(\tau) + \\ + \int_0^\tau K(\tau-\omega)t_{\text{ср}}(\omega)d\omega + F(\tau), \quad (24)$$

где  $K(\tau-\omega)$  – разностное ядро

$$K(\tau-\omega) = \sum_{i=1}^7 \sum_{\gamma=1}^{\infty} \Phi_i(\tau) \cdot A_{\kappa,\gamma,i}(\tau) \cdot B_{\gamma,i}^2(\tau) \cdot \\ \cdot e^{-R_{\gamma,i}(\tau)(\tau-\omega)}; \quad (25)$$

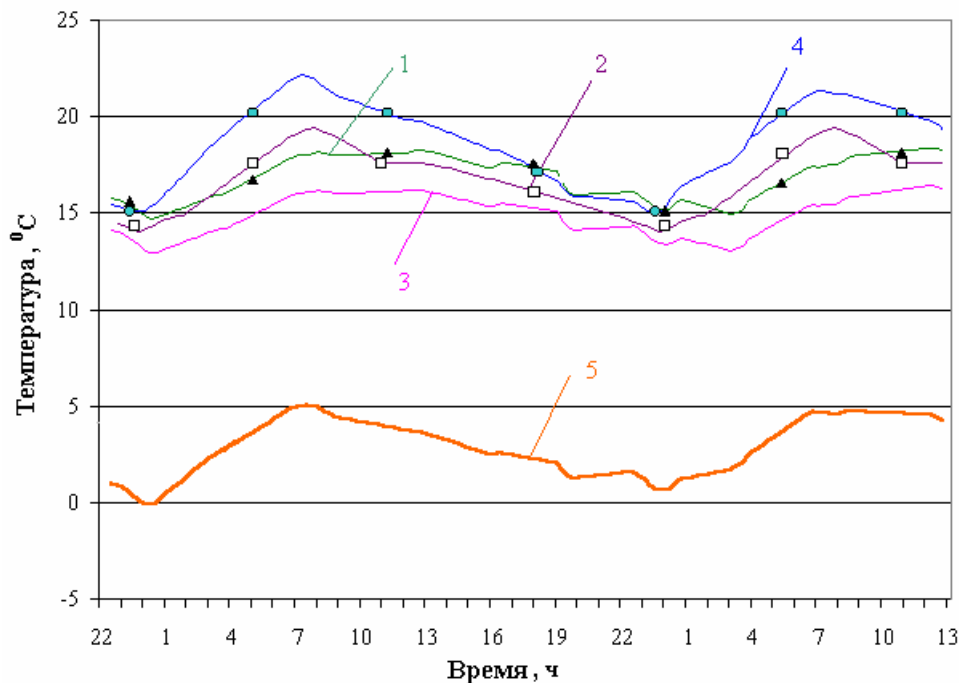
$$\Phi_i(\tau) = \frac{F_i \cdot \alpha_{в,к,i}(\tau)}{c\rho V}; \quad \Phi(\tau) = \sum_{i=1}^7 \Phi_i(\tau);$$

$$C_1(\tau) = -\Phi(\tau).$$

При реализации решения уравнений (18)-(21) и (24) фигурирующие в них интегралы заменялись конечными суммами с применением квадратурных формул Ньютона-Котесса с весовой экспоненциальной функцией. В целом редуцированная задача об определении теплового режима рассматриваемого помещения сводилась к системе 12-ти алгебраических уравнений, решение которой осуществилось методом Гаусса.

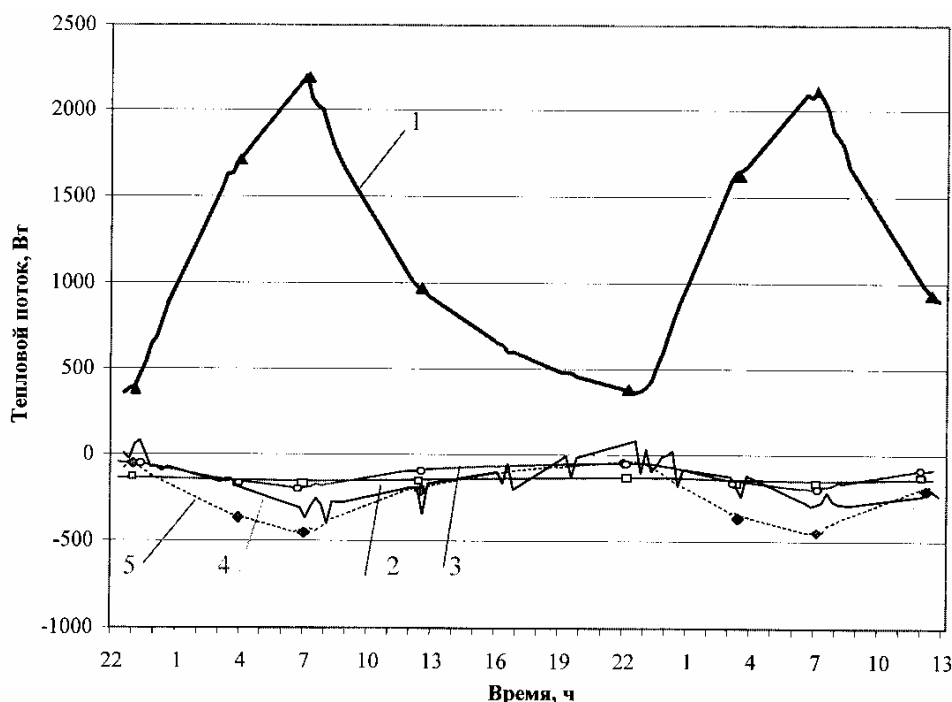
Достоверность полученных расчетных данных подтверждена их удовлетворительным согласованием с результатами лабораторных испытаний исследуемого помещения в натуральную величину с напольной ЭКСО-ТА в климатическом комплексе КиевЗНИИЭП [3]. Максимальное расхождение расчетных и экспериментальных данных как по температурам, так и по тепловым потокам не пре-

вышало 10 %, а среднее расхождение составляло, соответственно, 6,1 % и 3 % (рис. 5, кривые 1, 2). На рис. 5 и 6 представлены характерные данные проведенных расчетных и экспериментальных исследований. Как видно из рис. 5, значения температур внутренних поверхностей наружных стен (кривые 1-3) в основном ниже температуры внутреннего воздуха (кривая 4). При этом перепад температур между внутренним воздухом и поверхностью стен и, соответственно, тепловые потоки к стенам (рис. 6, кривые 2-5) в период нагрева пола возрастают по абсолютной величине. Как свидетельствуют полученные данные, перепад температур между внешней поверхностью наружных стен и наружным воздухом и, соответственно, тепловые потери стен в окружающую среду остаются практически постоянными во времени. К тому же, согласно данным сравнительного анализа, величина тепловых потерь через наружные стены оказывается практически одинаковой в случае радиаторного и электротеплоаккумуляционного отопления. В условиях реализации по-



**Рис. 5. Зависимость от времени температуры внутренних поверхностей наружных ограждений и воздуха помещения: 1, 2 – торцевая стена; 3 – фасадная стена; 4 – воздух помещения; 5 – окно. 1, 3, 4, 5 – экспериментальные данные, 2 – расчет.**





**Рис.6. Зависимость от времени теплового потока, отдаваемого полом, и теплопотерь через наружные ограждения (эксперимент при  $t_n = -25^{\circ}\text{C}$ ): 1- тепловой поток, отдаваемый полом в помещение; 2 – теплопотери окна; 3 – теплопотери фасадной стены; 4 – теплопотери в подвал; 5 – теплопотери торцевой стены.**

следнего резкие колебания температуры наружных стен наблюдаются в так называемом слое «резких колебаний», который расположен в прилежащем к помещению слое. Причем в период нагрева электропола имеет место аккумуляция теплоты в этом слое, что способствует сглаживанию амплитуды колебаний температуры воздуха внутри помещения. Что касается внешнего слоя наружных стен, то, как следует из полученных данных, резкие изменения температуры в нем коррелируются практически только с изменением во времени температуры наружного воздуха.

### Вывод

В трехслойных наружных стенах помещения, в отличие от однослойных, при одновременном действии «внутренней» и «наружной» нестационарностей, (вызванных соответственно прерывистым теплоаккумуляционным напольным электроотоплением и суточными колебаниями температуры наружного воздуха) влияние первой из них локализуется во внутреннем слое «резких колебаний», а второй – в наружном слое, отделен-

ном от внутреннего слоем эффективного утеплителя. При этом наружные стены помещения, аккумулируя выделяющуюся электрополом теплоту, способствуют уменьшению амплитуды колебаний температуры внутреннего воздуха, и, как следствие, созданию стабильности теплового режима в помещении.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Богословский В.Н. Строительная теплофизика.- М.: Высшая школа, 1982.- 415 с.
2. Черних Л.Ф. Фізико-математична модель теплового режиму приміщення з електротеплоаккумуляційною системою опалення підлогою, що гріє.- Будівництво України, 2002.- № 5.- С. 36-39.
3. 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.

Получено 15.10.2004 г.