

фасадною теплоізоляцією. Вимоги до проектування, улаштування та експлуатації

11. ДСТУ Б В.2.6-34 "Конструкції будинків та споруд. Конструкції зовнішніх стін з фасадною теплоізоляцією. Класифікація й загальні технічні вимоги";

12. ДСТУ Б В.2.6-35 "Конструкції будинків та споруд. Конструкції зовнішніх стін з фасадною теплоізоляцією та опорядженням індустріальними елементами з вентильованим повітряним прошарком. Загальні технічні умови";

13. ДСТУ Б В.2.6-36 "Конструкції будинків та споруд. Конструкції зовнішніх стін з фасадною теплоізоляцією та опорядженням штукатурками. Загальні технічні умови";

14. ДСТУ Б В.2.7-182:2010 "Будівельні матеріали. Методи визначення терміну ефективної експлуатації та теплопровідності будівельних ізоляційних матеріалів у розрахункових та стандартних умовах".

15. Соколов А.М. Метод оценки перехода температуры через ноль в разных слоях стены за время отопительного периода / Соколов А.М., Фаренюк Г.Г. // Будівельні конструкції. - 2008. - Вип.68, -С.102-108.

УДК 697.353:691

*Черных Л.Ф., доктор техн. наук, с.н.с.,  
рук. отдела строительной теплофизики и  
инженерного оборудования КиевЗНИИЭП,  
г. Киев, Украина*

## **ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ ПОМЕЩЕНИЙ ПРИ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕМ ТЕПЛОАККУМУЛЯЦИОННОМ НАПОЛЬНОМ ЭЛЕКТРООТОПЛЕНИИ**

В настоящее время теплоаккумуляционная напольная система электрического отопления жилых и общественных зданий является одной из энергоэффективных систем отопления, широко применяемых в мировой энергетической практике. Доля электроотопления зданий в ряде развитых стран мира составляет, в среднем, 30...40 %, а во Франции, Норвегии достигает 80 %. В Украине же доля электроотопления не превышает 1% [1,2].

Перспективность применения в Украине теплоаккумуляционного электроотопления связана с его высокой энергоэффективностью, основанной на использовании «излишков» ночной электроэнергии, отпускаемой по льготным тарифам, которые в 3 раза меньше дневных. Кроме того, перспективность применения напольного отопления в жилых и общественных зданиях связана с тем, что только при напольном отоплении создаются комфортные тепловые условия для человека, когда температура на уровне ног составляет 26...28°C, а на уровне головы 18...20°C. Перспективность широкого применения указанного отопления обуславливает необходимость проведения углубленных исследований сложных нестационарных процессов теплообмена в отапливаемых помещениях.

Рассмотрим типовое конструктивное решение исследуемого электропола, рис. 1, который состоит из 2-х ярусов: нижний представляет собой 3 изолированных электрокабеля, равномерно с шагом 6 см уложенных на панель междуэтажного перекрытия и покрытых слоем бетона 90 мм.

Чтобы тепло, выделяемое в электрокабелях, распространялось в обогреваемое помещение, под кабели укладывается слой высокоэффективного теплоизолятора стиродур и отражающий экран из фольгоизола; в верхнем ярусе уложен такой же по мощности один кабель комфортного отопления в 20 мм от поверхности пола.

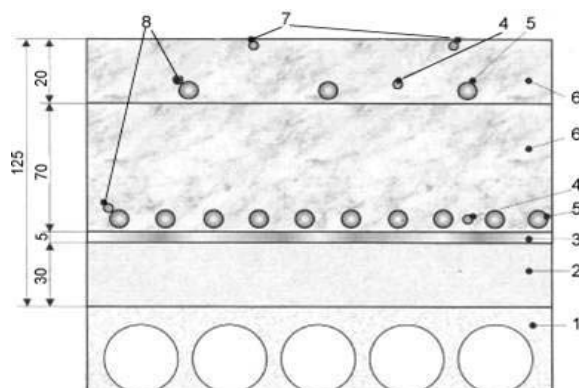


Рис. 1 Схема исследуемого электропола: 1—плита междуэтажного перекрытия; 2 — теплоизоляция; 3—отражающая изоляция; 4 — датчик температуры бетонного слоя; 5 —нагревательные кабели; 6— теплоаккумулирующий слой; 7,8 — датчики температуры поверхности бетонного слоя и кабеля

Обоснование уточненной физической модели теплообмена в таком помещении выполнено на примере угловой комнаты как несущей наибольшую тепловую нагрузку при создании комфортного теплового режима, рис. 2. При этом установлены основные особенности теплообмена по сравнению с традиционным конвективным отоплением, а именно:

- 1) нестационарность процессов теплообмена в помещении, обусловленная прерывистой подачей электроэнергии в пол с 23 до 7 часов утра и суточными колебаниями температуры воздуха снаружи зданий;
- 2) основная аккумуляция тепла напольной отопительной панелью;
- 3) дополнительная теплоаккумуляция остальными, кроме пола, ограждающими конструкциями, что приводит к превышению на  $2...3^{\circ}\text{C}$  значений радиационных температур по сравнению с температурой воздуха внутри помещения;
- 4) лучисто-конвективный теплообмен в помещении с соотношением радиационной и конвективной составляющих в среднем 50/50%;
- 5) зависимость от температуры коэффициентов лучистой и конвективной теплоотдачи на внутренних поверхностях конструкций.

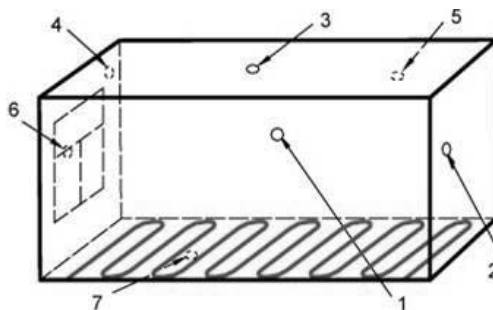


Рис. 2 Расчетная схема помещения: 1, 2 — внутренние стены; 3 — потолок; 4 — наружная фасадная стена; 5 — наружная торцевая глухая стена; 6 —окно; 7 — электропол

Перечисленные особенности теплообмена обусловили сложность математической постановки нестационарной нелинейной задачи определения теплового режима помещения с электрополом с отдельным учетом лучистой и конвективной составляющих теплообмена и зависимостью от температуры коэффициентов лучистой и конвективной теплоотдачи на внутренних поверхностях ограждений. Математически задача имеет вид:

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

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

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

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

$$\frac{\partial t_i(\delta_i, \tau)}{\partial x} + h_{e,i}(t) t_i(\delta_i, \tau) = h_{e,\kappa,i}(t) t_{cp}(\tau) + h_{e,\lambda,i}(t) t_{R_i}(\tau); \quad (4)$$

- для однослойных наружных стен ( $i=4,5$ ) и окна ( $i=6$ ) основное операторное уравнение идентично (1), граничное условие на их внутренней поверхности аналогично (4), а начальное и граничное условия на наружной поверхности имеют вид:

$$t_i(x, 0) = t_i(0, 0) + [t_i(\delta_i, 0) - t_i(0, 0)] \frac{x}{\delta_i}; \quad (5)$$

$$-\frac{\partial t_i(0, \tau)}{\partial x} + h_{n,i} t_i(0, \tau) = h_{n,i} t_z(\tau), \quad (6)$$

$$\text{где } t_i(0, 0) = t_n(0) - \frac{q(0)}{\alpha_{n,i}}; \quad t_i(\delta_i, 0) = t_{cp}(0) - \frac{q(0)}{\alpha_{e,i}}; \quad q(0) = \frac{t_{cp}(0) - t_n(0)}{\frac{1}{\alpha_{e,i}} + \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_{n,i}}};$$

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

$$\frac{\partial t_{k,i}(x, \tau)}{\partial \tau} = a_{k,i} \frac{\partial^2 t_{k,i}(x, \tau)}{\partial x^2}; \quad \tau > 0; \quad 1_{k-1} < x < 1_k; \quad (7)$$

$$t_{k,i}(x, 0) = M_{k,i} x + M_{(k+3)i}; \quad (8)$$

$$-\frac{\partial t_{1,i}(0, \tau)}{\partial x} + h_{n,i} t_{1,i}(0, \tau) = h_{n,i} t_z(\tau); \quad (9)$$

$$\lambda_{k,i} \frac{\partial t_{k,i}(l_{k,i}, \tau)}{\partial x} = \lambda_{(k+1),i} \frac{\partial t_{(k+1),i}(l_{k,i}, \tau)}{\partial x}; \quad k = 1, 2; \quad (10)$$

$$\lambda_{k,i} \frac{\partial t_{k,i}(l_{k,i}, \tau)}{\partial x} = \frac{1}{R_{k,i}} [t_{(k+1),i}(l_{k,i}, \tau) - t_{k,i}(l_{k,i}, \tau)]; \quad (11)$$

$$\frac{\partial t_{3,i}(l_{3,i}, \tau)}{\partial x} + h_{e,3,i}(t) t_{3,i}(l_{3,i}, \tau) = h_{e,\kappa,3,i}(t) t_{cp}(\tau) + h_{e,\lambda,3,i}(t) t_{R_{3,i}}(\tau); \quad (12)$$

- для греющего пола ( $i=7$ ) основное операторное уравнение, начальное условие и граничное на поверхности, обращенной в помещение, такие же, как и для нейтральных внутренних стен (1), (2) и (4). Граничное условие на греющей поверхности слоя бетона, покрывающей электрическую кабельную систему, запишется таким образом:

$$-\lambda_i \frac{\partial t_i(0, \tau)}{\partial x} = \begin{cases} \frac{T}{m} q_s - \text{при } 23^\circ \text{C} < \tau \leq 7^\circ \text{C}; \\ 0 & - \text{при } 7^\circ \text{C} < \tau \leq 23^\circ \text{C} \end{cases} \quad (13)$$

где  $t_i(x, \tau)$ ,  $t_{k,i}(x, \tau)$  - текущие температуры в конструкциях, осредненные по соответствующих теплоотдающих (тепловоспринимающих) поверхностях;  $t_{cp}(x, \tau)$  - температура среды (воздуха) в помещении;  $h_{в,к,i}(t)$ ,  $h_{в,л,i}(t)$ ,  $h_{н,i}$  - относительные коэффициенты конвективной и лучистой теплоотдачи на внутренней и наружной поверхностях  $i$ -го ограждения;  $R_{к,i}$  - контактное сопротивление в местах сопряжения слоев  $i$ -ых трехслойных стен;  $M_{к,i}$ ,  $M_{(k+3),i}$  - численные коэффициенты;  $l_{к,i}$  - координаты контактных поверхностей  $i$ -ых трехслойных стен;  $q_3$  - удельный тепловой поток, выделенный электрокабелем;  $T$  - продолжительность цикла работы пола, равная суткам;  $m$  - продолжительность нагревания пола;  $t_{R_i}(x, \tau)$  - радиационная температура для углового помещения относительно  $i$ -ой конструкции, которая определяется как средневзвешенная по площадях  $F_i$  окружающих поверхностей:

$$t_{R_i}(\tau) = \left\{ \sum_{j=1}^7 [t_j(\tau) \cdot F_j] - t_i(\tau) \cdot F_i \right\} / \left[ \sum_{j=1}^7 F_j - F_i \right]; \quad (14)$$

Температура воздуха помещения, фигурирующая в вышеприведенных задачах, определяется на основании соответствующего уравнения теплового баланса. При этом нагревание воздуха осуществляется за счет теплоотдачи от электропола, внутренних стен и потолка, а также бытовых тепловыделений; охлаждается же воздух потерями теплового потока через наружные стены, окно и вентиляционным воздухообменом. Тогда уравнение теплового баланса воздуха в помещении будет иметь вид

$$Q_{cp}(\tau) = Q_3(\tau) + \sum_{i=1}^3 Q_{в,i}(\tau) + Q_{быт}(\tau) - \sum_{i=4}^5 Q_{н,i}(\tau) - Q_{ок}(\tau) - Q_{вент}(\tau), \quad (15)$$

где  $Q_{cp}(\tau) = \rho V c_p dt_{cp}(\tau) / d\tau$  - тепловой поток для нагревания воздуха помещения;  $c$  - удельная массовая теплоемкость воздуха;  $\rho$  - плотность воздуха;  $V$  - объем воздуха в помещении;  $Q_3(\tau)$ ,  $Q_{в,i}(\tau)$  - поступление теплового потока к воздуху от электропола и внутренних стен и потолка;  $Q_{быт}(\tau) = q_{быт}(\tau) F_{пл}$  - бытовые тепловыделения;  $q_{быт}(\tau)$  - удельные бытовые тепловыделения;  $Q_{н,i}(\tau)$ ,  $Q_{ок}(\tau)$  - потери теплового потока через наружные стены и окно;  $Q_{вент}(\tau) = (q_{инф} + q_{вент}) [t_{cp}(\tau) - t_n(\tau)]$  - вентиляционный тепловой поток за счет инфильтрации воздуха через притворы в окнах и притока воздуха через форточки или вентиляционные щели в коробках;  $q_{инф}$ ,  $q_{вент}$  - удельный инфильтрационный и вентиляционный тепловые потоки при перепаде температур воздуха внутри и снаружи помещения в  $1^\circ\text{C}$ ;  $q_{инф} = \rho V_{инф}$ ,  $q_{вент} = \rho V_{вент}$ ;  $V_{инф}$ ,  $V_{вент}$  - объемные потери инфильтрационного и вентиляционного воздуха;  $t_n(\tau)$  - температура воздуха снаружи помещения, которая изменяется по закону:

$$t_n(\tau) = t_0 + A \cos 2\pi / T (\tau - \varphi) \quad (16)$$

Здесь  $t_0$  - среднемесячная суточная температура воздуха снаружи помещений самого холодного зимнего (января) месяца определенного населенного пункта;  $A$  - среднесуточная амплитуда колебаний температуры воздуха снаружи помещений того же месяца;  $\varphi$  - начальная фаза колебаний температуры воздуха снаружи помещений.

Для решения представленной задачи (1)...(15) разработан аналитически-численный метод определения теплового режима помещения отдельно с однослойными и трехслойными наружными стенами. Для линеаризации исходной нелинейной задачи по зависимости от температуры указанных коэффициентов, расчетный отрезок времени от 0 до конечного момента  $\tau_k$  был разбит на большое количество  $m$  достаточно малых промежутков времени  $\Delta\tau_m$ , равных 10-ти минутам, на которых эти коэффициенты можно считать постоянными. Это позволило на каждом таком малом промежутке применить аналитический метод конечных интегральных преобразований [3,4], который был усовершенствован тем, что улучшена сходимость рядов, представляющих решения полученных задач. Метод для помещения с однослойными стенами включает решения следующих 4-х задач:

*I-ой нестационарной нелинейной симметричной задачи теплопроводности для 2-х внутренних стен и потолка.* Здесь на каждом  $m$ -ом малом промежутке времени получены интегральные уравнения для температуры внутренней поверхности каждой конструкции и конвективного теплового потока, передаваемого от нее воздуху помещения.

*II-ой нестационарной нелинейной задачи теплопередачи через 2-е наружные стены и окно при переменных температурах воздуха внутри и снаружи помещения.* Получены аналогичные интегральные уравнения.

*III-ей нестационарной нелинейной задачи теплопроводности для электропола, работающего в теплоаккумуляционном режиме.* Как показал эксперимент, теплотери пола в нижнее смежное помещение не превышали 5,4% тепла, выделяемого электрокабелем. Поэтому принималось, что все тепло от кабеля передается теплопроводностью к внутренней поверхности пола, а сам электропол рассматривался как однослойная неограниченная пластина с равномерным подводом тепла на ее нижней поверхности, который моделирует удельный тепловой поток, выделяемый электрокабелем. Получены интегральные уравнения для температуры поверхности пола и отводимого теплового потока

*IV-ой задачи решения уравнения теплового баланса воздуха в помещении (15), которое включает тепловые потоки, приходящие к воздуху от внутренних стен и потолка, от электропола, за счет бытовых тепловыделений и уходящие через наружные стены, окно, за счет вентиляции.* При подстановке в это уравнение полученных аналитических выражений конвективных тепловых потоков к воздуху помещения, оно превращается в интегро-дифференциальное

$$\frac{dt_{cp}(\tau)}{d\tau} = C_1(\tau_m) \cdot t_{cp}(\tau) + \int_0^{\tau} K(\tau - \omega) t_{cp}(\omega) d\omega + F_1(\tau) + F_2(\tau), \quad (17)$$

где  $K(\tau - \omega)$  - разностное  $(\tau - \omega)$  ядро типа свертки

$$K(\tau - \omega) = \sum_{i=1}^7 \sum_{j=1}^{\infty} \Phi_i(\tau_m) \cdot A_{\kappa, y, i}(\tau_m) \cdot B_{y, j}^2(\tau_m) \cdot e^{-R_{y, j}(\tau_m) \cdot (\tau - \omega)}, \quad (18)$$

$\Phi_i(\tau_m) = \alpha_{\kappa, \kappa, i}(\tau_m) \cdot F_i / c\rho V$ ;  $C_1(\tau_m) = -\sum_{i=1}^7 \Phi(\tau_m)$ ;  $F_1(\tau)$  - член, содержащий температуру воздуха помещения  $t_{cp}(\tau)$  у линейном виде;  $F_2(\tau)$  - свободный член относительно  $t_{cp}(\tau)$ , но включает интегралы от неизвестных радиационных температур.

Интегро-дифференциальное уравнение теплового баланса воздуха (17) является 8-ым, замыкающим систему 7-ми интегральных уравнений для температур поверхностей ограждающих конструкций. Полученная система затем численным методом с заменой интегралов конечными суммами с применением квадратурных формул Ньютона-Котеса с весовой экспоненциальной функцией  $\rho(\tau) = \exp[R_{y, j}(\tau_m) \cdot \tau]$  превращена в систему 8-и алгебраических уравнений. Она решена методом Гаусса и составлена компьютерная программа расчета.

Расчетная схема решения задачи с трехслойными наружными стенами остается такой же, кроме теплопередачи через трехслойные стены. Алгоритм решения контактных задач теплопроводности продемонстрирован на примере двухслойной стены путем разбивки ее на 2 однослойные с использованием условия непрерывности удельного теплового потока в месте контакта. Использование второго условия неидеального контакта, позволило получить интегральное уравнение Вольтерра II-го рода типа свертки для искомого теплового потока. Аналогично задача теплопередачи через трехслойную стену сводится к 3-м однослойным. Искомые тепловые потоки в 2-х местах контакта слоев определены из системы 2-х векторных двумерных интегральных уравнений Вольтерра II рода типа свертки. Эта система тем же численным методом для каждой стены сведена к системе 2-х алгебраических уравнений для удельных тепловых потоков. В итоге, к системе 8-и уравнений для помещения с однослойными стенами добавляются 4-е уравнения удельных тепловых потоков - получаем систему 12-и уравнений, она также решена методом Гаусса, составлена компьютерная программа, которая объединена с программой для однослойных стен. Общая программа внесена в Государственный

реєстр свідетельств авторського права на роботу.

Используя разработанное программное обеспечение и теорию теплоустойчивости акад. Лыкова А.В., решены 3 важные задачи, на основе которых разработаны рекомендации по нормированным и комфортным параметрам микроклимата помещения.

**Задача I.** *Выбор материала теплоаккумулирующего слоя электропола.* Для аккумулирующего слоя выбирается материал с высоким коэффициентом теплоусвоения

$$\xi = \sqrt{a/\omega}, \quad (19)$$

который имеет размерность длины. Здесь  $a$  – коэффициент температуропроводности материала,  $\omega$  – суточная частота тепловой волны.

В теории подобия характеристикой теплоусвоения слоя электропола служит безразмерная величина  $f$  – степень теплоаккумуляции слоя, введена Лыковым А.В.

$$f = \xi/l = 1/2\sqrt{Pd}, \quad (20)$$

где  $Pd = \omega R^2/a$  – число Предводителя, определяющее способность к нагреванию аккумулирующего слоя;  $l$  – толщина слоя;  $R$  – характерный размер слоя,  $R = l/2$ . При этом единица объема аккумулирующего слоя при его равномерном нагревании по всей толщине воспринимает количество тепла  $Q_{\text{спр}}$ , а величина степени теплоаккумуляции слоя  $f$  показывает, какая часть от этого количества  $Q_{\text{спр}}$  действительно аккумулируется  $Q_{\text{ак}}$

$$f = Q_{\text{ак}}/Q_{\text{спр}} \quad (21)$$

Таким образом, выбор материала теплоаккумулирующего слоя следует осуществлять по величине  $f$ , значение которой должно приближаться к 1, а число Предводителя  $Pd$  принимать минимальное значение.

Анализ теплофизических характеристик широко применяемых строительных материалов показал, что лучшими для целей аккумуляции тепла являются бетоны, а среди них тяжелый бетон, который имеет наибольшие значения этих характеристик: наибольшую, почти равную 1, степень теплоаккумуляции слоя  $f$  и наименьшее число Предводителя  $Pd$ .

Результаты анализа подтверждены расчетами по разработанной программе теплового режима данного помещения. Показана высокая эффективность применения для теплоаккумуляции тяжелого бетона с коэффициентом теплоусвоения 0,101 м в сравнении с низкой эффективностью легкого перлитопластбетона, для которого этот коэффициент составляет 0,052м, что в 2 раза меньше, чем для тяжелого бетона.

**Задача II** *состояла в определении необходимой толщины бетонного слоя электропола.* Из решения предыдущей задачи получено максимальное среди бетонов значение коэффициента теплоусвоения тяжелого бетона 0,101 м. Оно выражает глубину проникновения тепловой волны от электрокабеля в слой бетона за полупериод. В теории теплоустойчивости этот слой называется слоем резких колебаний, в нем амплитуда гасится в 2 раза, а его толщина составляет лишь 1/9 длины тепловой волны. Поэтому минимальная толщина аккумулирующего слоя не может быть меньше толщины слоя резких колебаний. Его максимальная величина была определена расчетами по разработанной программе при  $t_{\text{н}} = -25^\circ\text{C}$  из условия, что максимальная температура поверхности слоя и среднесуточная амплитуда колебания температуры воздуха в помещении не превышают нормированные значения.

Расчеты, рис. 3, показали, что максимальная температура поверхности бетона удовлетворяет нормированной  $28^\circ\text{C}$  при толщине 0,23 м, при которой отопительная панель не может быть использована как по увеличению расхода бетонной массы, так и по увеличению нагрузок на опорные конструкции зданий. Поэтому в разработанном ДБН «ЭКСО» [5] максимальная температура поверхности пола не нормируется. Она может некоторое время (2 или 3 часа) в период использования помещения с 7 часов до 22 превышать нормируемую  $28^\circ\text{C}$  и быть, например, равной  $30...32^\circ\text{C}$ . Ее допустимое значение определяется другим нормированным параметром  $T_E^{\text{норм}} \leq 4 \text{ К}\cdot\text{ч}$ , который ограничивает перерасход тепла за указанное время и имеет вид

$$T_E = (\Theta_{F_{max}} - \Theta_{F_{cp}}^{норм}) \cdot \Delta\tau / 2 \quad (22)$$

На рис. 3 наряду с максимальной температурой 3 приведено пунктиром ее допустимое значение 4. Видно, что максимальная температура поверхности бетонного слоя не будет превышать ее допустимую величину, начиная со значения ниже 32°C, которое отвечает толщине бетонного слоя 0,132 м. Полученная толщина совпадает с толщиной 0,131 м для нормированной среднесуточной амплитуды колебания температуры воздуха в помещении  $\pm 2,5^\circ\text{C}$ , что определяет наибольшее значение необходимой толщины теплоаккумулирующего слоя тяжелого бетона 0,132 м.

Однако, выбор необходимой толщины бетонного слоя по экстремально низкой температуре воздуха  $-25^\circ\text{C}$ , которая в Украине бывает редко и недолго, не экономичен. Учитывая тот факт, что при уменьшении толщины слоя от максимальной 0,132 м до минимальной 0,101 м допустимая максимальная температура поверхности увеличивается незначительно ( $32,8^\circ\text{C} - 32^\circ\text{C} = 0,8^\circ\text{C}$ ), рационально выбрана в качестве необходимой минимальная толщина 0,101 м, которая удовлетворяет расчетным отопительным температурам воздуха до  $-20^\circ\text{C}$  большинства регионов Украины. Для самых северных районов с температурами воздуха от  $-20^\circ\text{C}$  до  $-25^\circ\text{C}$  предложен **комплексный подход сочетания основного теплоаккумуляционного электроотопления с компенсирующими методами незначительного дополнительного отопления**: 1) *дневного отопления 3-я нижними кабелями или одним верхним*; 2) *применения «пиковых» отопительных приборов*; 3) *подогрева приточного вентиляционного воздуха*.

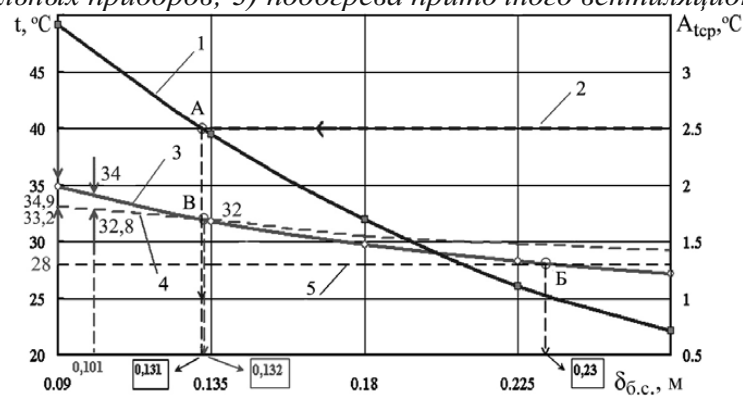


Рис. 3 Зависимость от толщины бетонного слоя среднесуточной амплитуды колебаний температуры воздуха в помещении и максимальной температуры поверхности бетонного слоя: 1,2– амплитуда колебаний температуры воздуха и ее нормированная; 3,4– максимальная и ее допустимая температура поверхности слоя; 5– нормированная температура поверхности пола; эксперимент и расчет,  $t_n = -25^\circ\text{C}$

Рассмотрим далее результаты экспериментальных исследований теплового режима помещения с электрополом, которые проводились в климатическом комплексе КиевЗНИИЭП, рис. 4. Данный комплекс является уникальным [6]. Основное его отличие от аналогичных комплексов Украины, России и других зарубежных стран заключается в том, что, во-первых, он имеет не прямоугольный, а Г-образный «холодный отсек», созданный на базе 2-х термобарокамер, расположенных под углом  $90^\circ$  одна к другой, что позволяет испытывать угол здания. Второе отличие заключается в том, что комплекс имеет подвал и чердак, что позволило испытать для помещения с электрополом угловой трехэтажный фрагмент здания.

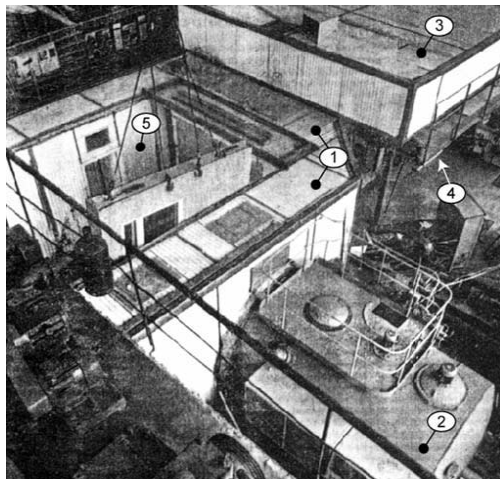


Рис. 4 Общий вид климатического комплекса КиевЗНИИЭП: 1 – Г-образный „холодный” отсек; 2,4 – термобарокамеры КТВВ-8000/2 и КТВВ-8000/4; 3 – чердак; 5 – „теплый” отсек

Проведено 2 цикла экспериментальных исследований. Целью 1-го цикла было экспериментальное подтверждение достоверности разработанной методики и программы расчета теплового режима помещения. Эксперимент проводился при 3-х температурах воздуха снаружи зданий: 1)  $-25^{\circ}\text{C}$ , равной минимальной отопительной расчетной в Украине; 2)  $-5,9^{\circ}\text{C}$ , которая равна среднесуточной января в г. Киеве; 3) той же  $-5,9^{\circ}\text{C}$  при ее суточных колебаниях. Результаты экспериментальных исследований в сопоставлении с расчетами по разработанной программе представлены графически зависимостями от времени температуры воздуха в помещении, внутренних поверхностей ограждающих конструкций и тепловых потоков от них, рис. 5...8. Их анализ показал:

1. Разработанная методика расчета теплового режима помещения при отоплении электрополом подтверждена экспериментом – средние экспериментальные и расчетные значения температур (рис. 5,6) и тепловых потоков (рис. 7) совпадают, соответственно, с точностью 3 и 6,1%, что вполне удовлетворительно.

2. Экспериментально подтверждено участие в аккумулировании тепла не только пола, но и всех ограждений: а) наружные стены сглаживают амплитуду колебания температуры воздуха в помещении, рис. 6; б) внутренние стены и потолок, рис. 8, то аккумулируют тепло от воздуха помещения, то отдают его назад воздуху.

3. На примере климатических условий г. Киева показано увеличение среднесуточной температуры воздуха в помещении за счет суточных колебаний температуры воздуха снаружи зданий.



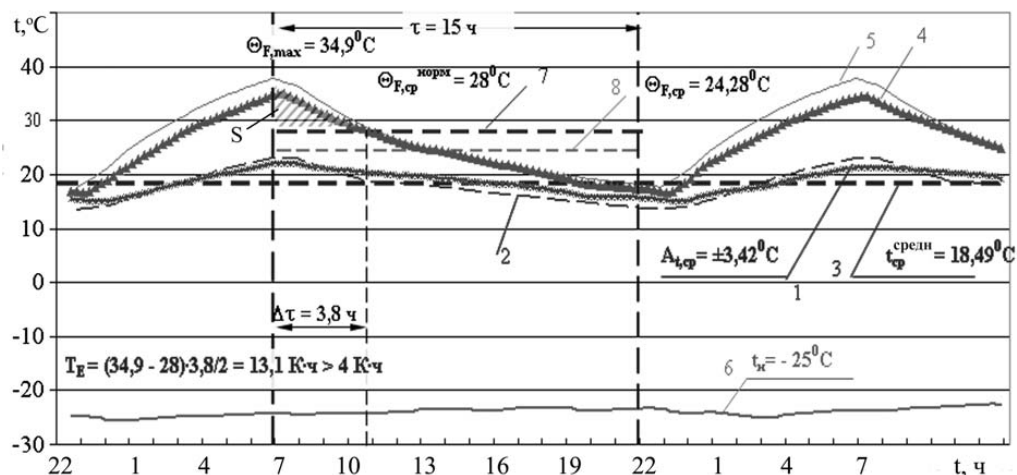


Рис. 5 Зависимость от времени температуры поверхности пола и воздуха внутри и снаружи помещения: 1, 2, 3 – температура воздуха помещения и ее среднесуточная; 4, 5 – температура поверхности слоя бетона; 6 – температура воздуха снаружи помещения; 7, 8 – нормированная и средняя температура поверхности слоя бетона (1, 3, 4, 6, 8 – эксперимент, 2, 5, 7 – расчет),  $\delta_{б,с} = 90$  мм,  $t_n = -25^\circ\text{C}$

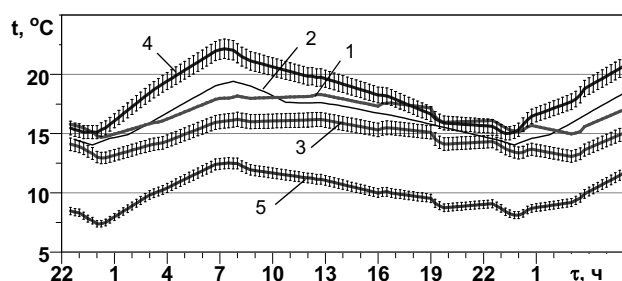


Рис. 6 Зависимость от времени температур поверхностей наружных ограждений и воздуха в помещении: 1, 2 – торцевая стена; 3 – фасадная стена; 4 – воздух; 5 – окно (1, 3, 4, 5 – эксперимент; 2 – расчет);  $\delta_{б,с} = 90$  мм,  $t_n = -25^\circ\text{C}$ ;  $\text{|||||}$  – границы доверительного интервала

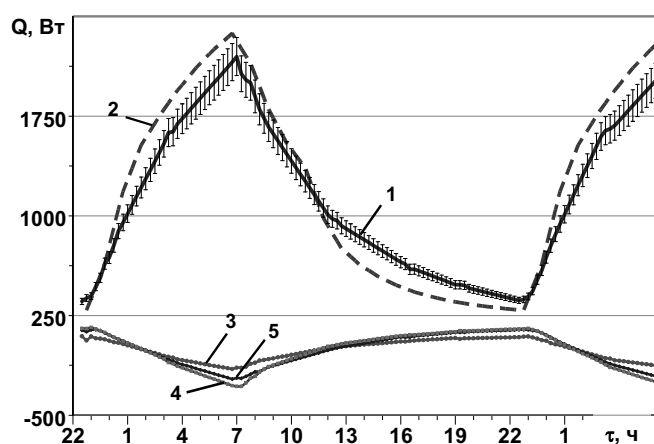


Рис. 7 Зависимость от времени теплового потока, отдаваемого полом в помещение и отдаваемого (получаемого) внутренними конструкциями: 1, 2 – тепловой поток, отдаваемый бетонным слоем; 3, 4, 5 – тепловой поток, отдаваемый (получаемый) глухой стеной, потолком и стеной с дверью (1, 3, 4, 5 – эксперимент; 2 – расчет);  $\delta_{б,с} = 90$  мм,  $t_n = -25^\circ\text{C}$ ;  $\text{|||||}$  – границы доверительного интервала



Рис. 8 Залежність від часу температури поверхностей внутрішніх конструкцій та повітря в приміщенні: 1 – глуха стіна; 2 – стіна з двер'ю; 3 – стіна; 4 – повітря в приміщенні; експеримент,  $\delta_{б,с} = 90$  мм,  $t_{н} = -25$  °С;  $\text{||||}$  – границі довірительного інтервала

Целью II-го цикла исследований было обоснование возможности обеспечения напольной ЭКСО-ТА как нормированных, так и комфортных условий в помещении:

а) нормированными являются 4 параметра: среднесуточная температура воздуха в помещении 17...20°С; среднесуточная амплитуда колебания температуры воздуха  $\pm 2,5$ °С; средняя по времени в период использования помещения температура поверхности пола, равная 28°С с постоянным и 31°С с временным пребыванием людей; максимальная температура поверхности пола ограничивается нормированным параметром  $T_E^{норм} \leq 4K \cdot ч$ ;

б) три условия тепловой комфортности: I-ое условие для жилых и общественных зданий определяется уравнением I-го условия комфортности для текущей и среднесуточной радиационной температуры

$$t_R = 29 - 0,57 t_{cp} \pm 1,5 \quad (23)$$

II-ое условие ограничивает интенсивность теплообмена человека: во-первых, на нагретой поверхности пола, температура которой не должна превышать 33°С; во-вторых, около холодной внутренней поверхности остекления окна, где допустимое значение температуры ограничивается удельным лучистым тепловым потоком 93 Вт/м<sup>2</sup> с поверхности тела человека, стоящего на расстоянии 1 м от окна.

III-е условие относится к регулированию теплового режима помещения; при автоматическом регулировании электроотопления оно всегда выполняется.

**Результаты** экспериментальных исследований по выполнению перечисленных нормированных и комфортных параметров исследуемого помещения представлены для 3-х ситуаций с:

А) толщиной бетонного слоя пола 90 мм и

Б) 160 мм при отсутствии дополнительного отопления;

В) толщиной бетонного слоя пола 90 мм и наличием комфортного отопления.

Для ситуации А эксперимент проводился при 3-х температурах воздуха снаружи зданий: 1)  $t_{н} = -5,9$ °С; 2)  $t_{н} = -5,9$ °С с суточными колебаниями; 3)  $t_{н} = -25$ °С. Проверка нормированных параметров показала, что они выполняются полностью при  $t_{н} = -5,9$ °С и выполняются частично при  $t_{н} = -25$ °С, а именно: не выполняются 2 параметра:

$$1) A_{t,ср}^{средн} = \pm 3,42^\circ\text{C} > \pm 2,5^\circ\text{C}; \quad 2) \Theta_{F_{max}} = 34,9^\circ\text{C} > 28^\circ\text{C}, \text{ рис. 5.}$$

Что же касается условий комфортности, то проверка I-го условия свидетельствует о том, что среднесуточная радиационная температура выполняется при всех 3-х температурах воздуха снаружи помещения, рис. 9 а). Текущая радиационная температура не выполняется даже при  $t_{н} = -5,9$ °С, так как с 18 до 22 часов наблюдается небольшой недогрев помещения, и только при учете естественных в природе суточных колебаний температуры воздуха это условие выполняется, рис. 9 б). Таким образом, температура  $t_{н} = -5,9$ °С в природных условиях является пределом, до которого выполняется I-е условие комфортности. В интервале температур -6°С...-25°С оно не

выполняется.

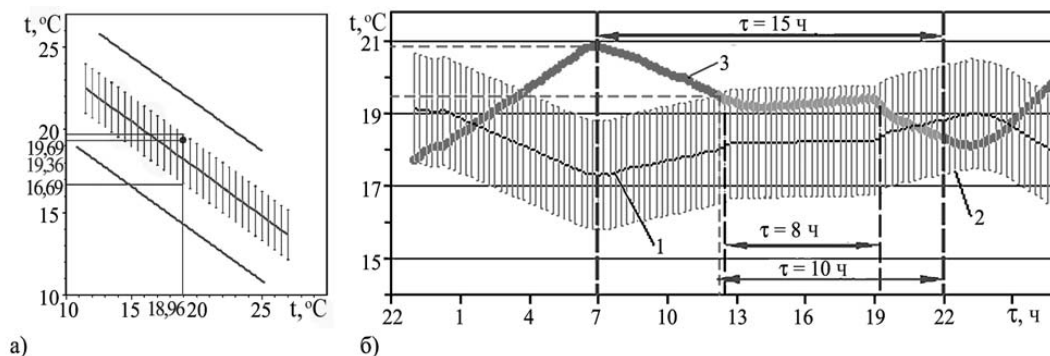


Рис. 9 Выполнение I-го условия: а) по среднесуточной радиационной температуре; б) по текущей радиационной температуре: 1- расчетная комфортная текущая радиационная температура; 2- заштрихованная область ее допустимых отклонений; 3 – радиационная температура, рассчитанная по данным эксперимента;  
 $\delta_{\delta,c} = 90 \text{ мм}$ ,  $t_n = [-5,9 + 2,65 \cos 2\pi/T(\tau-3,8)]^\circ\text{C}$

Проверка II-го условия тепловой комфортности показала, что максимальная температура поверхности бетонного слоя выдерживается меньше  $33^\circ\text{C}$  при  $t_n = -5,9^\circ\text{C}$ , но составляет  $34,9^\circ\text{C}$ , что больше  $33^\circ\text{C}$ , при  $t_n = -25^\circ\text{C}$ , рис. 5; минимальная температура поверхности остекления отвечает комфортным условиям всегда.

Как видно, для нестационарного теплового режима помещения с электрополом необходимо проверять не только среднесуточные, но и текущие значения большего, чем для помещения с традиционным отоплением, количества нормированных и комфортных параметров. Ввиду этого нами *предложена обобщенная методика*, согласно которой *оценка теплового режима помещения проводится по нормированным и комфортным температурам помещения, которые являются обобщающими характеристиками теплового состояния каждого конкретного помещения* независимо от вида системы отопления. Поэтому для испытываемой комнаты среднесуточные значения этих температур помещения были рассчитаны по ее известным параметрам при отоплении традиционной системой

$$t_n = 0,64 t_R + 0,36 t_{cp}, \quad (24)$$

В результате расчетов получены среднесуточные значения нормированной температуры помещения  $17,5^\circ\text{C}$  и комфортной температуры помещения  $20^\circ\text{C}$ .

На рис.10...12 в качестве примера применения данной методики представлены текущие температуры воздуха, температуры помещения и радиационной температуры. Как видно из рис. 10, 11, при  $t_n = -5,9^\circ\text{C}$  без суточных и с суточными колебаниями температуры воздуха снаружи зданий текущие температуры помещения практически укладываются в допустимый интервал температур. А при температуре воздуха  $-25^\circ\text{C}$  (рис. 12) наблюдаются резкие колебания температуры помещения с амплитудой  $\pm 3,42^\circ\text{C}$ , которая больше санитарно-гигиенической нормированной амплитуды  $\pm 3^\circ\text{C}$ . Проведенные расчетные исследования показали, что температура помещения, которая отвечает нормированным условиям, обеспечивается при температурах воздуха снаружи зданий до  $-20^\circ\text{C}$ .

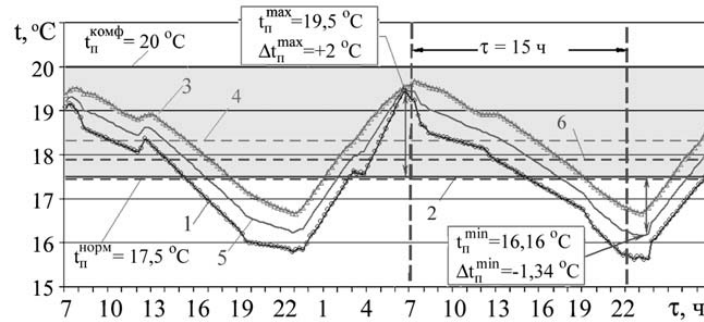


Рис. 10 Зависимость от времени: 1,2 – текущей и среднесуточной температуры воздуха; 3,4 – текущей и среднесуточной радиационной температуры; 5,6 – текущей и среднесуточной температуры помещения; эксперимент,  $t_n = -5,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\delta_{б,с} = 90\text{ мм}$

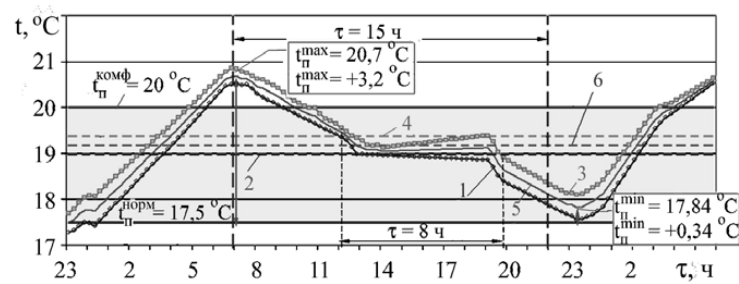


Рис. 11 Зависимость от времени: 1,2 – текущей и среднесуточной температуры воздуха; 3,4 – текущей и среднесуточной радиационной температуры; 5,6 – текущей и среднесуточной температуры помещения; эксперимент,  $\delta_{б,с} = 90\text{ мм}$ ,  $t_n = [-5,9 + 2,65 \cos 2\pi/T(\tau-3,8)]^{\circ}\text{C}$

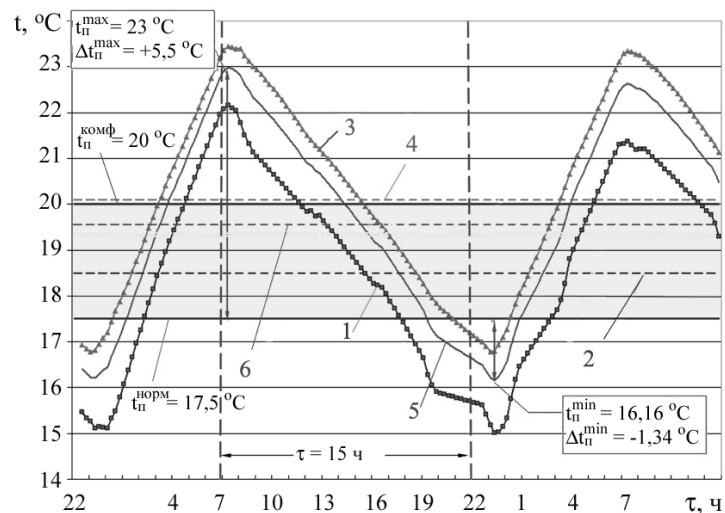


Рис. 12 Зависимость от времени: 1,2 – текущей и среднесуточной температуры воздуха; 3,4 – текущей и среднесуточной радиационной температуры; 5,6 – текущей и среднесуточной температуры помещения; эксперимент,  $t_n = -25^{\circ}\text{C}$ ,  $\delta_{б,с} = 90\text{ мм}$

Для ситуации, когда температура воздуха снаружи зданий находится в диапазоне  $-6...-25^{\circ}\text{C}$  предложено 2 способа создания комфортных условий:

**Б. Базовый тепловой режим с  $\delta_{б,с} = 160\text{ мм}$  (без дополнительного отопления)** при температуре воздуха  $-20^{\circ}\text{C}$  с суточными колебаниями и без них показал выполнение нормированных температур помещения (так как они выполняются для исследуемого помещения до температуры  $-20^{\circ}\text{C}$  при намного меньшей толщине слоя  $90\text{ мм}$ ), а также комфортных температур помещения – хотя среднесуточные экспериментальные температуры помещения

несколько меньше  $20^{\circ}\text{C}$ , их можно увеличить повышением температуры поверхности бетонного слоя электропола  $27,3$  и  $27,8^{\circ}\text{C}$  на  $1,5...2^{\circ}\text{C}$  (так как после этого они не превысят допустимую комфортную  $33^{\circ}\text{C}$ ). Аналогичное выполнение нормированных и комфортных температур помещения наблюдалось для наиболее холодного в Украине периода  $-20...-25^{\circ}\text{C}$ , то есть, базовый режим выполняется для всего отопительного периода.

**В.** Комфортное дневное дополнительное отопление при толщине  $\delta_{6,c} = 90$  мм.

На рис. 13 и 14 в качестве примера представлены данные о тепловом режиме помещения с комфортным отоплением при  $t_n = -12^{\circ}\text{C}$ . Исследования определили выполнение нормированных и комфортных температур помещения во всех 3-х случаях: 3-мя нижними кабелями, верхним кабелем и электроконвектором; наиболее эффективным оказалось отопление электроконвектор.

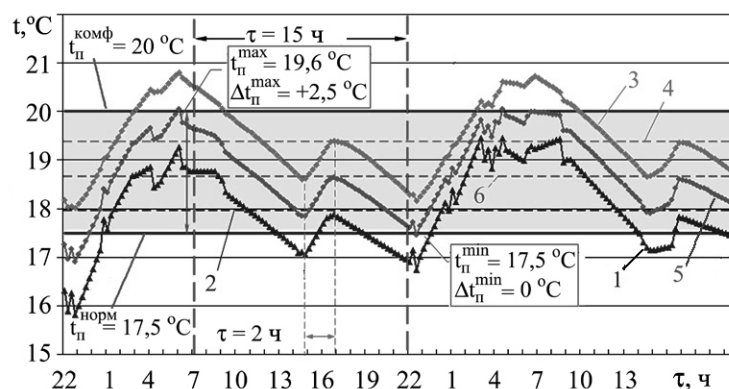


Рис. 13 Зависимость от времени текущей и среднесуточной: 1, 2 – температуры воздуха; 3,4 – радиационной температуры; 5,6 – температуры помещения; эксперимент,  $\delta_{6,c} = 90$  мм, дополнительное дневное отопление 3-а нижними кабелями,  $t_n = -12^{\circ}\text{C}$

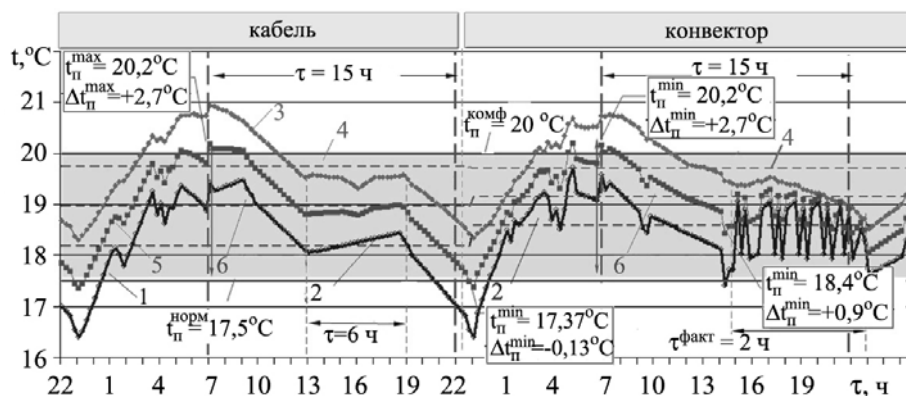


Рис. 14 Зависимость от времени текущей и среднесуточной: 1,2 – температуры воздуха; 3,4 – радиационной температуры; 5,6 – температуры помещения; эксперимент,  $\delta_{6,c} = 90$  мм,  $t_n = -12^{\circ}\text{C}$ ; дневное отопление верхним кабелем или конвектором

Результаты экспериментальных исследований показали, что во всех исследуемых режимах температуры помещения превышают нормированную температуру  $17,5^{\circ}\text{C}$ , что указывает на преимущество напольной лучисто-конвективной системы электроотопления по сравнению с традиционной конвективной создавать в помещении более комфортные условия, чем последняя.

Результаты выполненных исследований включены в ДБН В.2.5-24-2003 “Электрическая кабельная система отопления” [5].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Фиалко Н.М., Шевелев В.Б., Черных Л.Ф. Теплофизические основы напольного эл

екстротеплоаккумуляционного отопления жилых и общественных зданий // Сб. науч. трудов III-ей межд. конф. „Проблемы промышленной теплотехники”. Промышленная теплотехника. Приложение к журналу. – К.: ИТТФ, 2003.-Т. 25, №4. – С. 77-78.

2. Черных Л.Ф. Тепловые режимы помещений при энергосберегающем теплоаккумуляционном напольном электроотоплении: Дис...д.т.н.: 05.23.03. – К., 2009, – 445 с.

3. Драганов Б.Х., Черных Л.Ф., Ферт А.Р. Методика расчета теплового режима наружных ограждающих конструкций сельскохозяйственных зданий // -К.: УСХА, 1991. –126 с.

4. Черных Л.Ф. Сочетание метода малого параметра и конечных интегральных преобразований для задач теплопроводности // Известия АН СССР. - 1991. – Т. 37, №1. - С. 146-162.

5. ДБН В.2.5-24-2003. Электрическая кабельная система отопления. – К.: изд-во ГП “Укрархбудінформ”, 2003. - 31 с.

6. А.с. 1501005 СССР, МКИ G 05 D 22/00. Устройство для климатических испытаний / Черных Л.Ф., Волга В.С., Дизик В.М., Паламарчук Л.К., Санников И.В. - № 4164579/24-24; заявл. 22.12.1986; опубл. 15.08.1989, Бюл. №30.

УДК 697.353:691

*Черных Л.Ф., доктор техн. наук, с.н.с., рук.  
отдела, Оноприенко М.А., инженер,  
Отдел строительной теплофизики и  
инженерного оборудования КиевЗНИИЭП,  
г. Киев, Украина*

### ПРИМЕНЕНИЕ ВОЛОКНИСТЫХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ МИНЕРАЛЬНОЙ ВАТЫ И СТЕКЛЯННОГО ШТАПЕЛЬНОГО ВОЛОКНА В ЖИЛЫХ И ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЯХ

Минеральная вата это волокнистый материал который получают из силикатных расплавленных пород, металлургических шлаков и их смесей; стеклянную вату получают из расплавленной стеклянной массы.

Минераловатные и стекловолокнистые материалы условно можно разделить:

- а) за плотностью на мягкие, полужесткие и жесткие;
- б) за формой на маты, плиты, цилиндры;
- в) за обработкой на фольгованные, гидрофобизованные и др.

Волокнистые материалы из минеральной ваты, базальтового волокна и стеклянного штапельного волокна относятся к группе энергоэффективных утеплителей с коэффициентом теплопроводности в условиях эксплуатации  $\lambda=0,037...0,07$  Вт/(м·К). Так, если коэффициент теплопроводности:

- железобетона плотностью  $\rho=2500$  кг/м<sup>3</sup> составляет  $\lambda=2,04$  Вт/(м·К),
- кирпичной кладки из глиняного обыкновенного кирпича плотностью  $\rho=1800$  кг/м<sup>3</sup>  $\lambda=0,81$  Вт/(м·К),
- ячеистого бетона плотностью  $\rho=600$  кг/м<sup>3</sup>  $\lambda=0,26$  Вт/(м·К), то
- минеральной ваты и стекловолокна плотностью  $\rho=50...200$  кг/м<sup>3</sup>