

УДК 697.353:691

*Фіалко Н.М., член-кор. НАН України,  
доктор технічних наук, професор,  
Інститут технічної теплофізики НАН України,  
Черних Л.Ф., доктор технічних наук, старший науковий  
співробітник, ПАТ КиївЗНДІЕП,  
Лозан М.В., Онопрієнко М.А., інженери I категорії,  
Сухоросов І.М., директор ДБК-3, АТ ХК «Київміськбуд»,  
м. Київ*

## **ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМУ ПРИМІЩЕННЯ З ПІДЛОГОВИМ ТЕПЛОАКУМУЛЯЦІЙНИМ ЕЛЕКТРООПАЛЕННЯМ**

### **Постановка проблеми**

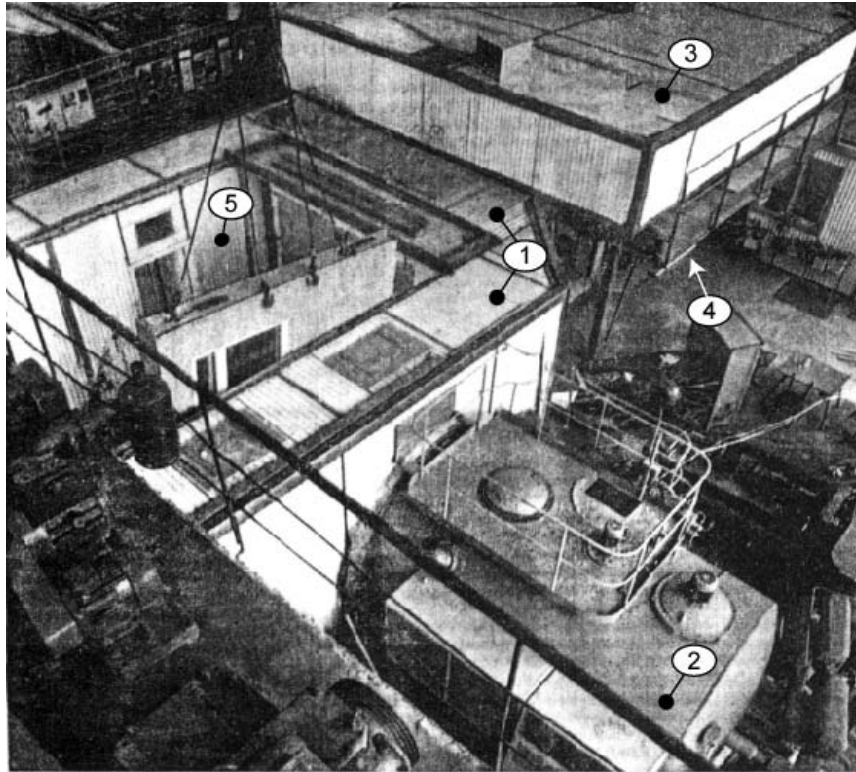
Структура паливно-енергетичного балансу України свідчить про те, що основним видом палива в країні є природний газ, більша частина якого імпортується. Щорічне подорожчання газу для України приводить до необхідності заміщення природного газу альтернативними джерелами енергії. Завдяки тому, що біля половини електричної енергії в Україні виробляється на атомних електростанціях, перспективним для нашої країни є застосування в якості енергоносія для систем опалення і гарячого водопостачання електричної енергії.

Вивчення світового досвіду показує, що в ряді передових країн світу (Німеччина, Швеція та ін.) частка електричного опалення будинків в середньому складає 30...40%, а у Франції, Норвегії досягає 80%. В Україні ж ця частка не перевищує 1%.

Серед різних видів електроопалення перспективним, особливо для країн з розвинутою атомною енергетикою, є теплоаккумуляційне, яке ґрунтується на використанні „надлишків” нічної електроенергії. В [1] розроблено метод розрахунку теплового режиму приміщення з підлоговою теплоаккумуляційною електричною кабельною системою опалення (ЕКСО-ТА). В даній статті приведено експериментальне підтвердження достовірності розробленої методики розрахунку теплового режиму приміщення, опалювального підлоговою системою ЕКСО-ТА.

### **Експериментальні дослідження в кліматичному комплексі КиївЗНДІЕП**

Експериментальні дослідження проводились в умовах, які максимально наближені до натурних. Для цього в КиївЗНДІЕП під керівництвом автора (А.С. 15010105) розроблено, виготовлено і змонтовано унікальний дослідний комплекс модульного типу (рис. 1), аналога якому немає в світі. Він дозволяє виконувати дослідження в модулях, які за своїми розмірами співпадають з реальними приміщеннями першого, середнього і верхнього поверхів будинків з фасадним або кутовим розташуванням. Як приклад, в дисертації наведено результати досліджень кутового приміщення, яке має найбільше навантаження, тобто найбільш жорсткі умови щодо створення комфортного теплового режиму при теплоаккумуляційному опаленні. Цей комплекс складається з 3-х відсіків: 1) Г-подібного „холодного” відсіку 1 (рис. той же), що імітує зимові кліматичні умови до  $-50^{\circ}\text{C}$  в стаціонарному і нестаціонарному режимах та примикає до 2-х термобарокамер 2 і 4 КТВV-8000/2 і КТВV-8000/4, які розташовані під прямим кутом одна до одної; 2) „теплого” відсіку 5, що створює мікроклімат приміщення, з підвалом під ним; 3) операторського відсіку, що дозволяє розмістити вимірювальну апаратуру.



**Рисунок 1 - Загальний вигляд кліматичного комплексу КиївЗНДЦП:**

1 – Г-подібний „холодний” відсік; 2,4 – термобарокамери КТВV-8000/2 і КТВV-8000/4;  
3 – горище; 5 – „теплий” відсік.

При проведенні експериментів у „теплий” відсік 5 опускався бетонний блок-кімната, який встановлювався над підвалом, що імітує суміжне приміщення нижнього поверху. Над блоком встановлено горище 3, яке імітує приміщення верхнього поверху, тобто досліджувався об’ємний триповерховий фрагмент будинку. Блок у „теплому” відсіку був установлений так, що його дві зовнішні стіни контактували з „холодним”, а дві внутрішні – з „теплим” відсіком, який імітує сусідні приміщення досліджуваного поверху. Блок мав площу 14,5 м<sup>2</sup>, висоту 2,75 м і товщину стін 80 мм. Для того, щоб термічний опір теплопередачі зовнішніх стін відповідав нормованому значенню 2,8 (м<sup>2</sup>×К)/Вт, до фасадної і торцевої стін блоку впритул приставлено тришарові панелі, термічний опір теплопередачі яких за даними попередньо виконаних випробувань задовольняв нормі. Термічний опір теплопередачі дерев’яного вікна з подвійним заскленням у роздільних переплетеннях складав 0,42 (м<sup>2</sup>×К)/Вт. Він був підвищений до 0,6 (м<sup>2</sup>×К)/Вт за рахунок заміни зовнішнього скла однокамерним склопакетом. Склопакет був виготовлений з 4-мм скла М1 з оптимальним повітряним прошарком 16 мм при загальній товщині 24 мм. Для підвищення теплоакumuлюючої здатності внутрішніх стін і стелі, по їх поверхні виконана цегельна кладка в півцеглини. Горизонтальні та вертикальні перерізи кліматичного комплексу наведено на рис. 2 і 3.

Для підвищення точності вимірювальних величин зовнішні стіни додатково були обстежені безконтактним інфрачервоним термометром з лазерним прицілом Raunger MX. На їх внутрішніх поверхнях були визначені термічно однорідні зони, у кожній з яких встановлювалася мінімальна кількість термопар і тепломірів, що дало змогу основну частину датчиків зосередити на поверхні підлоги, котра була розбита на 5 зон. З них 4 розташовувалися по периметру, а в центрі виділялося ще 7 зон. Вимірювання температури повітря в приміщенні здійснювалося 44-а хромель-копелевими термопарами, розташованими рівномірно по об’єму на 11 вертикалях.

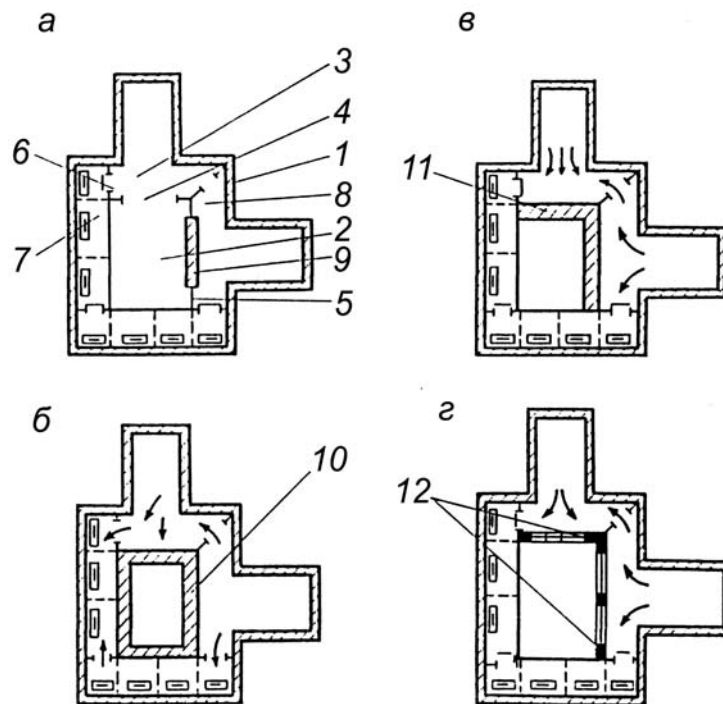
Через те, що параметри теплового стану досліджуваного приміщення при акумуляційному опаленні неперервно змінюються в часі, важливим є забезпечення можливості одночасного вимірювання великої кількості параметрів (температур в 159 точках і теплових потоків в 41 точці).

У кліматичному комплексі така можливість створена за рахунок комп'ютерної реєстрації сигналів від термопар і тепломірів, а також автоматичного керування записом їх показів з періодичністю в 15 хвилин.

При розробці методики експериментальних досліджень приміщення враховувались нормовані вимоги тепло- і повітрообміну його з навколишнім середовищем, три умови теплової комфортності та значення нормованої і комфортної температури приміщення. Повітряний режим забезпечувався подачею вентиляційного повітря з „холодного” відсіку кліматичного комплексу, при цьому вікно було загерметизоване. Проведено 2 цикли експериментальних випробувань.

**I-й цикл експериментальних досліджень теплового стану приміщення з 90-мм теплоакumuлюючим шаром електропідлоги з важкого бетону.** Метою 1-го циклу було експериментальне підтвердження достовірності розробленої методики і програми розрахунку теплового режиму приміщення, опалювальною підлоговою ЕКСО-ТА. Температура повітря зовні приміщення підтримувалась на рівні: 1)  $-5,9^{\circ}\text{C}$  - середньомісячна добова температура найбільш холодного зимового місяця (січня) в м. Києві; 2)  $-5,9^{\circ}\text{C}$  з врахуванням її добових коливань з середньою амплітудою  $\pm 2,65^{\circ}\text{C}$  стосовно до умов м. Києва; 3)  $-25^{\circ}\text{C}$ , що відповідає мінімальній для розрахунків систем опалення в Україні. Нагрівання підлоги здійснювалося 3-а нижніми кабелями, сумарна потужність яких відповідала тепловтратам при заданій температурі повітря зовні приміщення (табл. 1).

Приклади результатів досліджень при  $t_{\text{в}} = -5,9 \dots -25^{\circ}\text{C}$  наведені на рис. 8...13. Аналіз результатів експериментів показав:



**Рисунок 2 - Горизонтальний розріз комплексу КиївЗНДІЕП для досліджень виробів:**

а - вертикальної конструкції 9; б - об'ємного блоку 10; в - вертикального кутового стикового з'єднання 11; г - вікон 12: 1 - робочий об'єм; 2 - „теплий” відсік; 3 - „холодний” відсік; 4 - проріз для випробовуваної конструкції; 5 - стінка-штора; 6 - нестационарні перегородки; 7 - блоки „теплого” відсіку; 8 - блоки „холодного” відсіку.

**1. Розроблена методика розрахунку теплового режиму приміщення з підлоговою ЕКСО-ТА підтверджена експериментом** – середнє розходження експериментальних і розрахункових даних по температурах (рис. 4, 5 та 6) та теплових потоках (рис. 7) складає, відповідно, 3,0 і 6,1%, що є цілком задовільним.

Таблиця 1 - Таблиця потужностей нагрівачів системи опалення

Температура повітря зовні приміщення $t_3$ , °С	Режим роботи системи опалення	Кількість включених електрокабелів, шт.	Сумарна потужність електрокабелів, Вт	Термін дії, год/добу
-5,9	Стационарний цілодобовий	1	651	24
	Теплоаккумуляційний	3	1953	8
-5,9±2,65	Теплоаккумуляційний	3	1953	8
-25	Стационарний цілодобовий	1	1276	24
	Теплоаккумуляційний	3	3883	8

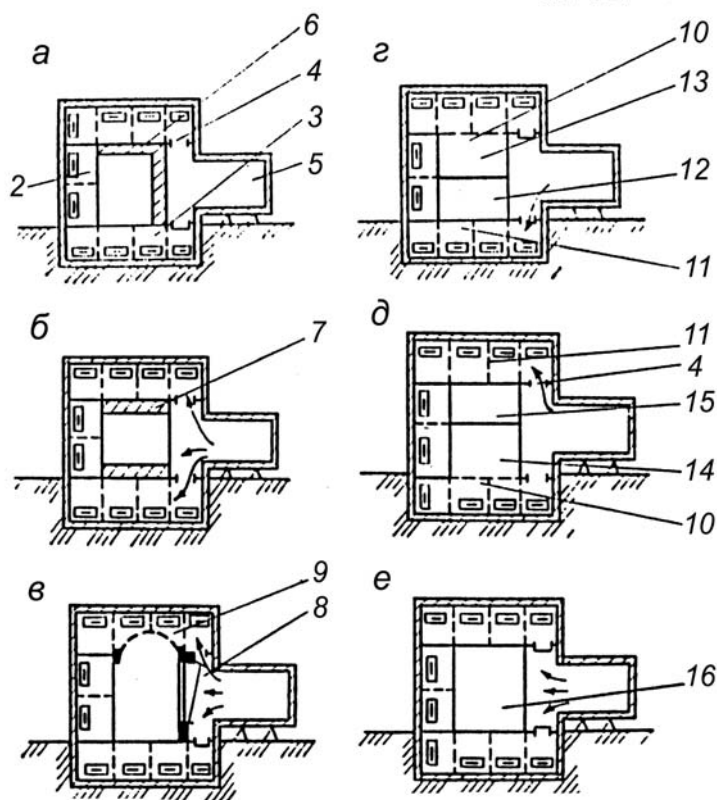
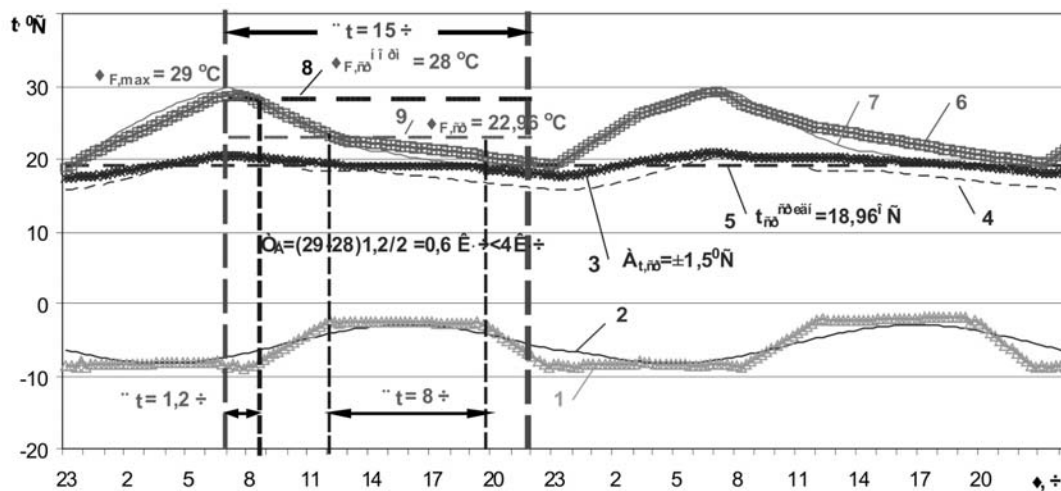


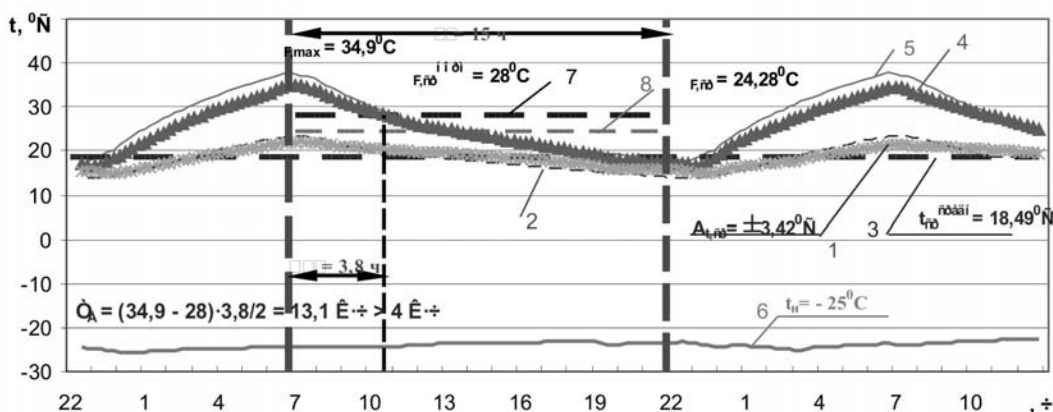
Рисунок 3 - Вертикальний розріз комплексу КиївЗНДІЕП:

а - із горизонтальним кутовим стиковим з'єднанням; б - із горизонтальними конструкціями;  
в - з вітриною і zenітним ліхтарем; г - при імітації стану „нижній поверх-підвал”;  
д - „верхній поверх – горище”; е - „житлове – допоміжне приміщення”.



**Рисунок 4 - Залежність від часу температури поверхні підлоги та повітря всередині і зовні приміщення:** 1, 2 – температура повітря зовні приміщення; 3, 4, 5 – поточна температура повітря в приміщенні та її середньодобова; 6,7 – температура поверхні бетонного шару; 8, 9 - нормована та середня за часом температура поверхні шару бетону (1, 3, 5, 6, 9 - експеримент; 2, 4, 7, 8– розрахунок);  $\delta_{6,ш} = 90$  мм,  $t_3 = [-5,9 + 2,65 \cos 2\pi/T(\tau - 3,8)]^\circ\text{C}$ .

**2. Експериментально підтверджено участь в акумулюванні тепла не тільки підлоги, але й усіх огорожень приміщення.** Так, зовнішні стіни (рис. 6), крім теплозахисних функцій, виконують функції стабілізації теплового стану приміщення. Рівень температур їх внутрішніх поверхонь (криві 1...3) нижче температури повітря в приміщенні (крива 4). Перепад температур між повітрям і поверхнею стін та, відповідно, теплові потоки до стін в процесі зарядки підлоги зростають. У той же час перепад температур між стінами і повітрям зовні них, і, відповідно, теплові втрати стін у навколишнє середовище залишаються практично постійними. З цього випливає, що всі внутрішні зміни теплового стану приміщення і його елементів при переході на переривчасте опалення практично не впливають на тепловтрати в навколишнє середовище. Щодо зміни температури зовнішніх стін, то вони відбуваються в шарі різких коливань, який розташований з боку приміщення. Причому в період зарядки електропідлоги має місце акумулювання тепла в цьому шарі, а в період розрядки – віддача його назад повітря, що сприяє згладжуванню коливань температури повітря в приміщенні.



**Рисунок 5 - Залежність від часу температури поверхні підлоги та повітря всередині і зовні приміщення:** 1, 2, 3– температура повітря приміщення і її середньодобова; 4, 5 – температура поверхні шару бетону; 6 – температура повітря зовні приміщення; 7, 8 – нормована і середня температура поверхні шару бетону (1, 3, 4, 6, 8 – експеримент, 2, 5, 7 – розрахунок),  $\delta_{6,ш} = 90$  мм,  $t_3 = -25^\circ\text{C}$ .

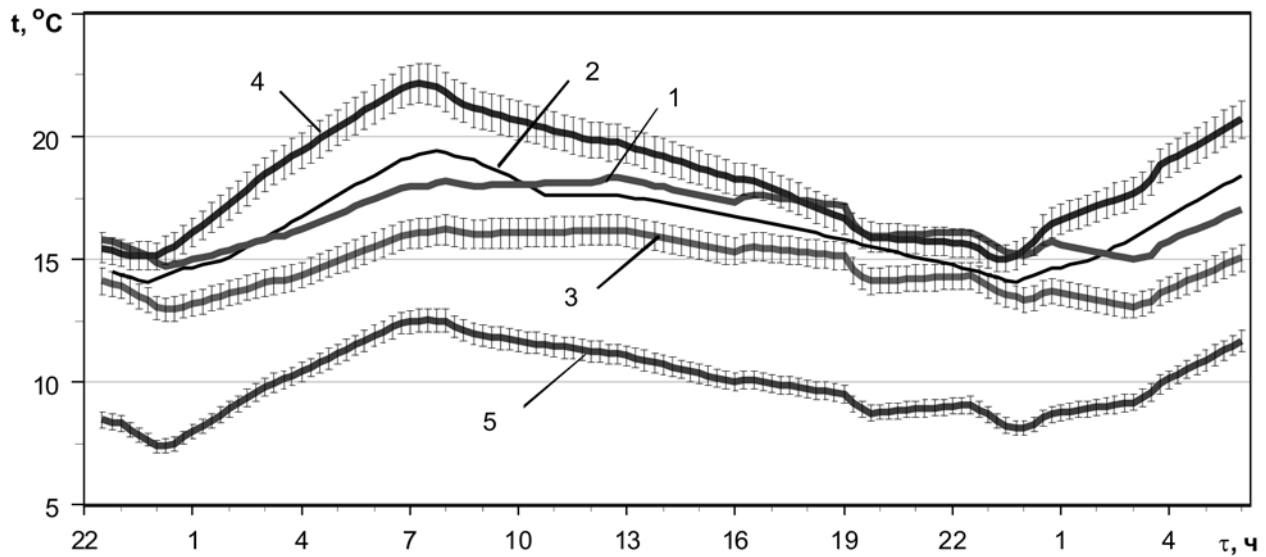


Рисунок 6 - Залежність від часу температури поверхонь зовнішніх огорожень і повітря в приміщенні: 1, 2 - торцева стіна; 3 - фасадна стіна; 4 - повітря; 5 - вікно (1, 3, 4, 5 - експеримент; 2 – розрахунок);  $\delta_{\text{б,ш}} = 90 \text{ мм}$ ,  $t_3 = -25 \text{ °C}$ ;  $\text{|||||}$  – границі довірчого інтервалу

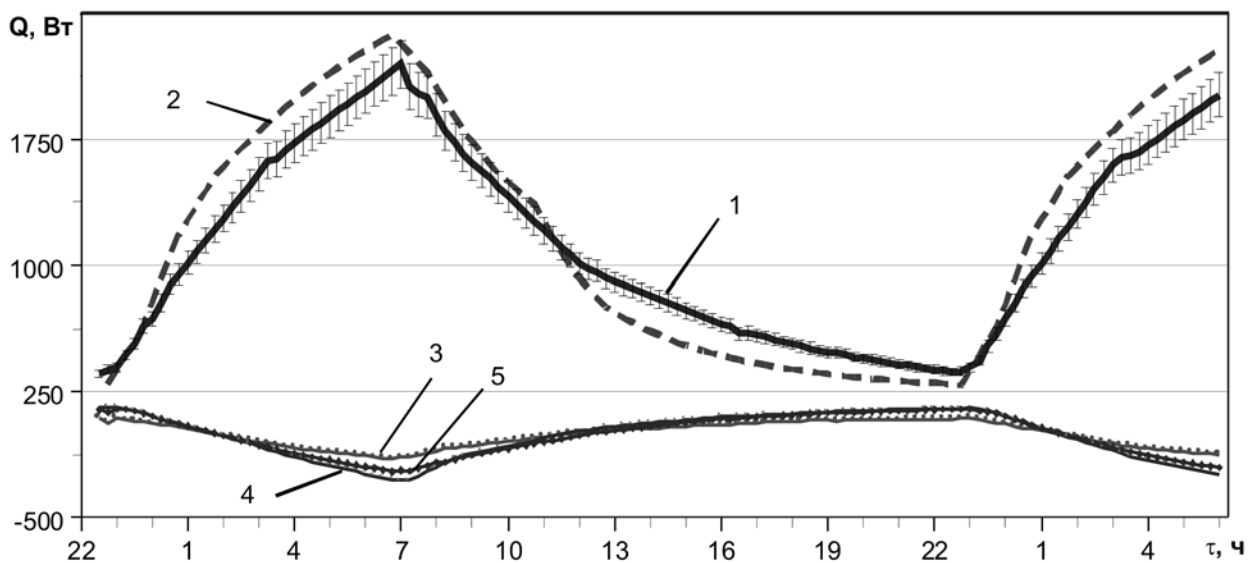
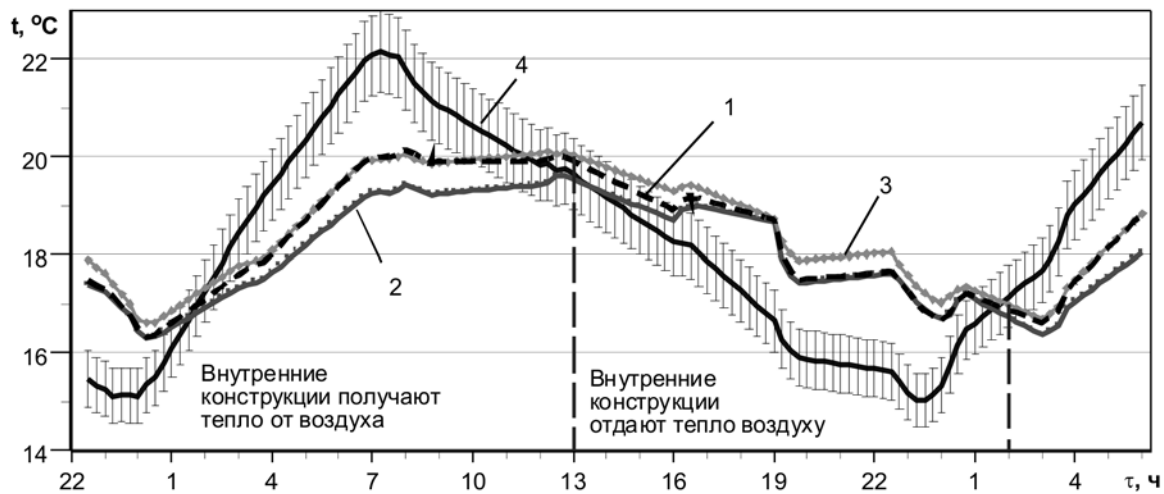


Рисунок 7 - Залежність від часу теплового потоку, який віддається підлогою в приміщення і віддається (одержується) внутрішніми конструкціями: 1, 2 – тепловий потік, що віддається бетонним шаром; 3, 4, 5 – тепловий потік, який віддається (одержується) глухою стіною, стелею і стіною з дверима (1, 3, 4, 5 - експеримент; 2 – розрахунок);  $\delta_{\text{б,ш}} = 90 \text{ мм}$ ,  $t_3 = -25 \text{ °C}$ ;  $\text{|||||}$  – границі довірчого інтервалу

Внутрішні стіни і стеля (рис. 8) в період зарядки підлоги протягом 11-ти годин одержують тепло від повітря, а останні 13 годин при розрядці віддають його назад повітря, що забезпечує зниження амплітуди коливань температури останнього.

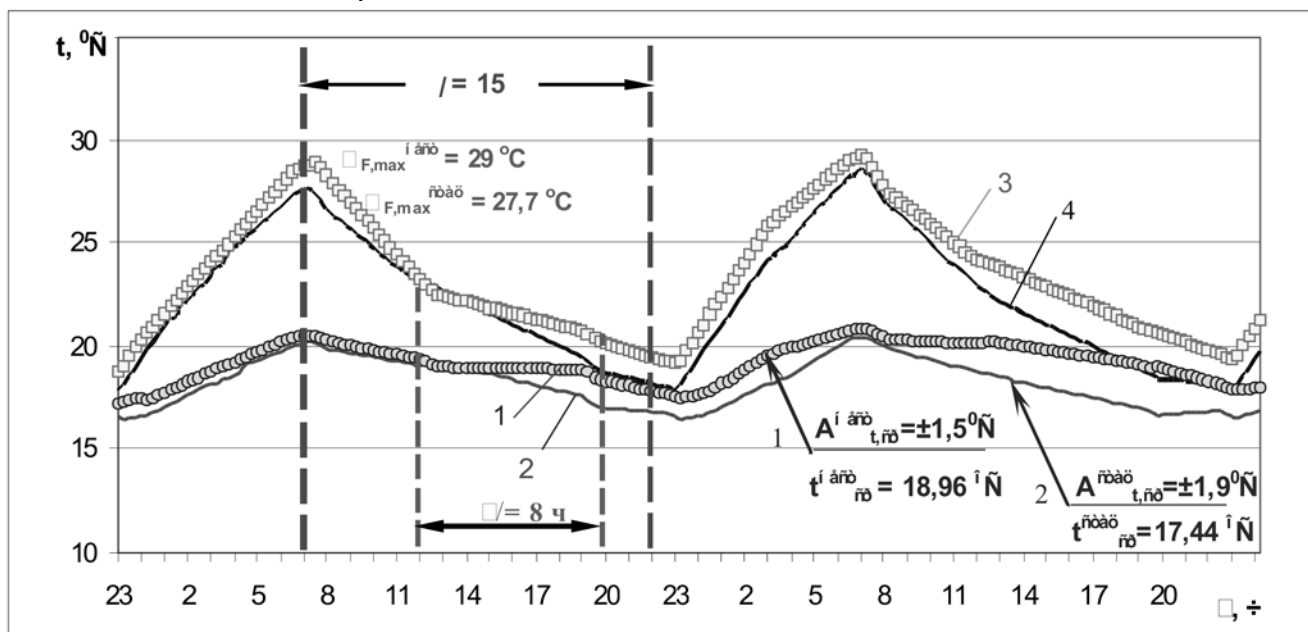
Сумарну кількість тепла при  $t_3 = -25 \text{ °C}$ , котра внутрішніми стінами і стелею то акумулюється, то, навпаки, віддається, можна оцінити в 545 Вт, рис. 7. Якщо врахувати, що електропідлога віддає в приміщення в середньому 1168,9 Вт, то очевидно, що внутрішні конструкції вносять

значний вклад в процес теплообміну в приміщенні.



**Рисунок 8 - Залежність від часу температури поверхонь внутрішніх конструкцій і повітря в приміщенні: 1 – глуха стіна; 2 - стіна з дверима; 3 –стеля; 4 - повітря в приміщенні; експеримент,  $\delta_{\text{б,ш}} = 90 \text{ мм}$ ,  $t_3 = -25 \text{ °C}$ ;  $\text{|||||}$  – границі довірчого інтервалу**

**3. Наявність сприятливого впливу нестационарності температури повітря зовні приміщення на його тепловий режим** показано на прикладі коливання середньомісячної температури повітря січня  $-5,9\text{°C}$  з середньодобовою амплітудою  $\pm 2,65\text{°C}$  в м. Києві (рис. 13). Навіть для систем цілодобового електроопалення привабливим є те, що добові коливання температури повітря поза будинками зменшують втрати електроенергії вдень, коли вона дорога. Максимум споживання енергії зсувається на ніч, коли вона дешева. Для теплоаккумуляційного опалення додаються такі переваги:



**Рисунок 9 - Зіставлення експериментальних температур повітря в приміщенні і поверхні бетонного шару в стаціонарному  $t_3 = -5,9\text{°C}$  і нестационарному  $t_3 = [-5,9 + 2,65 \cos 2\pi / T(t-3,8)]\text{°C}$  зовнішніх режимах:**

1,2- повітря; 3,4 - поверхня бетонного шару (1,3 - нестационарний режим; 2,4 - стаціонарний режим);  $\delta_{\text{б,ш}} = 90 \text{ мм}$

1) добові коливання температури повітря зовні будинків сприяють зниженню середньодобової амплітуди коливання температури повітря приміщення. Так, при незмінній температурі зовні приміщення амплітуда коливання температури повітря в приміщенні  $A_{t,cp}$  складає  $\pm 1,9^{\circ}\text{C}$  (крива 2), а при наявності добових коливань температури  $t_3$  величина  $A_{t,cp} = \pm 1,5^{\circ}\text{C}$  (крива 1). Це пояснюється тим, що максимальна температура повітря приміщення приходиться на ніч, коли працює опалення, але зменшується при надходженні холодного вентиляційного повітря; мінімальна температура повітря приміщення приходиться на день при відключеному опаленні, але збільшується за рахунок підвищення температури припливного повітря зовні;

2) спостерігається також підвищення максимальної температури поверхні бетонного шару підлоги (крива 3) на  $1,3^{\circ}\text{C}$  у порівнянні зі стаціонарним зовнішнім режимом (крива 4), що пояснюється припливом вночі охолодженого повітря і необхідним збільшенням витрат електроенергії на його підігрів;

3) зростає на  $1,52^{\circ}\text{C}$  середньодобова температура повітря приміщення (крива 1) в порівнянні з зовнішнім стаціонарним режимом (крива 2) за рахунок припливу вдень теплого повітря зовні. Отже, середньодобову температуру повітря приміщення можна зменшити, для чого досить зменшити споживану електроенергію, одержавши її економію, одночасно знизивши температуру поверхні підлоги.

### Висновки

1. Створено унікальний автоматизований кліматичний комплекс КиївЗНДІЕП, котрий дозволяє проводити експериментальні випробування теплових режимів приміщень при різному їх розташуванні відносно фасаду будинків та при різних видах систем опалення в умовах, близьких до натурних.

2. З використанням вказаного комплексу розроблена методика експериментальних досліджень теплового режиму таких приміщень, на основі якої експериментально підтверджено участь в акумулюванні тепла не тільки підлоги, а й усіх огорожень, та показано позитивний вплив добових коливань температури повітря зовні будинків на нестационарний тепловий режим приміщення при підлоговій ЕКСО-ТА.

3. Експериментом підтверджено розроблену методику розрахунку теплового режиму приміщення при підлоговій ЕКСО-ТА - середнє розходження експериментальних і розрахункових даних по температурах та теплових потоках складає, відповідно, 3,0 і 6,1%, що є цілком задовільним.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Черних Л.Ф. Метод розрахунку теплового режиму приміщення із тришаровими зовнішніми стінами і з електротеплоакумуляційною системою опалення підлогою, що гріє // Будівництво України. – 2003. - №3. - С. 40-43.

2. Черных Л.Ф. Климатический комплекс для исследований конструкций / Черных Л.Ф., Ферт А.Р., Паламарчук Л.К., Санников И.В. // Архитектура и строительство России. – 1989. - №4. - С. 26-27.

3. 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.

4. Черних Л.Ф. Кліматичний комплекс КиївЗНДІЕП – устаткування для лабораторних теплотехнічних досліджень приміщень / Шевельов В.Б., Черних Л.Ф. // Будівництво України. – 2005. - №4. – С. 17-20.

5. ДБН В.2.5-24:2012. Электрическая кабельная система отопления. – К.: изд-во ГП «Укрархбудінформ», 2012. – 83 с.