

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМУ ПРИМІЩЕНЬ З ЕЛЕКТРИЧНОЮ КАБЕЛЬНОЮ СИСТЕМОЮ ОПАЛЕННЯ ТЕПЛОАКУМУЛЯЦІЙНОЇ ДІЇ (ЕКСО-ТА) ПРИ МІНІМАЛЬНІЙ В УКРАЇНІ ТЕМПЕРАТУРІ ЗОВНІШНЬОГО ПОВІТРЯ

КиївЗНДІЕП разом із НПП “Елетер” вперше в Україні провів теоретичні [1] й експериментальні [2] дослідження теплофізичних характеристик моделі приміщення типового житлового будинку, обладнаного “теплою” підлогою. Для цієї мети використовувалася найбільш перспективна конструкція електронагрівальної підлоги, що складається з низькотемпературного ізольованого кабелю, покладеного під теплоаккумуляційним шаром важкого бетону. Якщо таку підлогу включати на “зарядку” уночі (наприклад, з 23 до 7 годин ранку, коли “дешева” електроенергія), а інший час використовувати акумуляовану всім приміщенням теплоту, то така система виявиться за капітальними витратами набагато дешевшою інших традиційних систем опалення.

На підставі нової методики, розробленої в КиївЗНДІЕП [1], була досліджена триповерхова модель типового кутового приміщення в натуральну величину багатопверхового будинку з електропідлогою, що працює в акумуляційно-переривчастому режимі. Під час випробувань у кліматичному комплексі КиївЗНДІЕП [2], крім впливу зимових кліматичних умов для найнижчих в Україні розрахункових для опалення зовнішніх температур $t_{н.п} = -25^{\circ}\text{C}$, моделювався також вплив сусідніх приміщень даного поверху, верхнього і нижнього поверхів. Такий великомасштабний експеримент уперше проведений у лабораторних умовах.

Два цикли експериментальних досліджень включали наступні задачі:

- 1) для електропідлоги товщиною 90 мм (існуюча модель) визначити й експериментально підтвердити умови, при яких основні показники акумуляційно-переривчастого режиму (температура поверхні електропідлоги й амплітуда коливань температури внутрішнього повітря) будуть відповідати діючим в Україні нормам;

- 2) для підлоги товщиною 160 мм (удосконалений варіант) визначити й експериментально перевірити можливість її експлуатації в аку-

муляційно-переривчастому режимі для всього діапазону розрахункових температур зовнішнього повітря для умов України.

У цій статті розглянемо можливості удосконаленого варіанта електропідлоги.

Режими роботи 160-мм підлоги при зовнішній температурі -25°C

Другий цикл експериментальних досліджень був проведений після реконструкції електропідлоги, при якій поверх існуючої підлоги товщиною $\delta_1 = 90$ мм був покладений додатковий теплоакумулюючий шар. При виборі матеріалу для додаткового шару виходили з результатів розрахунково-аналітичних досліджень, згідно з яким зниженню температури поверхні електропідлоги в теплоакумуляційному режимі сприяє його виконання з матеріалів з максимальним значенням комплексу $(\lambda \cdot \rho)$ – добуток теплопровідності бетону, λ , Вт/(м·К), на його щільність, ρ , кг/м³. Крім того, для зручності монтажу усередині моделі було бажано використовувати готові штучні вироби невеликого розміру. З наявного асортименту будівельних матеріалів найбільш придатною для цієї мети виявилася бетонна тротуарна плитка, що випускається серійно, виміряна щільність якої склала $\rho = 2400$ кг/м³. Для виготовлення додаткового шару була використана плитка прямокутної форми товщиною $\delta = 70$ мм, у підсумку загальна товщина теплоакумулюючого шару після реконструкції електропідлоги склала $\delta_2 = 160$ мм.

Крім того, при реконструкції підлоги були вжиті заходи для підвищення рівномірності температури поверхні підлоги. Для цього по всьому периметру підлоги вертикально до стін були покладені теплоізоляційні прокладки висотою в товщину тротуарної плитки з екструдированого пінополістиролу з дуже низьким коефіцієнтом теплопровідності $\lambda = 0,029$ Вт/(м·К). Ширина прокладок на границях підлоги із зовнішніми стінами складала 30 мм, а на границях із внутрішніми стінами – 15 мм. Призначення цих прокладок полягає в тому, щоб зменшити відтоки теплоти до зовнішніх і внутрішніх стін моделі і відповідно підвищити температуру граничних зон по периметру підлоги. Зменшення температурної нерівномірності приводить до зниження температурних максимумів при акумуляційно-переривчастому опаленні нагрітою підлогою.

Для більш повного використання нічного періоду зарядки електропідлоги нами було запропоновано обмежувати подачу електроенергії на кабелі, що гріють, при досягненні нормованого значення температури поверхні підлоги. Реалізація такого методу зарядки електро-

підлоги була здійснена за допомогою регулятора температури, що раніше використовувався як автомат безпеки від перегріву електропідлоги. Датчик цього регулятора був змонтований у верхньому ярусі бетонного шару і був розташований на глибині приблизно 20 мм від поверхні підлоги, тому треба було внести поправки до показів датчика по середній температурі поверхні підлоги. У період зарядки електропідлоги при досягненні заданого значення температури підлоги відбувалося вимикання всіх кабелів, що гріють, одночасно, а при охолодженні підлоги – їхнє повторне включення в роботу.

З реконструйованою 160-мм підлогою при температурі зовнішнього повітря $t_n = -25$ °C була намічена наступна серія дослідів:

- 1) стаціонарний режим, регулювання апаратури і приладів;
- 2) акумуляційно-переривчастий режим з підтопкою кабелем верхнього ярусу, виконуваною автоматично при зниженні температури внутрішнього повітря;
- 3) акумуляційно-переривчастий режим з автоматичною підтопкою електричним конвектором.

Автоматична комфортна підтопка верхнім кабелем чи конвектором

В експериментах при товщині підлоги $\delta_1 = 90$ мм було встановлено, що підтопка електроконвектором має безсумнівну перевагу перед підтопкою верхнім кабелем електропідлоги, це полягає в тому, що при підтопці конвектором у 3,3 раза зменшується споживання дорогої електроенергії в денний час. Для підтвердження цього важливого висновку було вирішено провести аналогічні експерименти для електропідлоги зміненої конструкції, що працює при температурі зовнішнього повітря $t_n = -25$ °C.

Попередньо були виконані розрахунки за методикою КиївЗНДІЕП [1] процесу опалення моделі з товщиною підлоги $\delta_2 = 160$ мм з денною підтопкою електропідлоги при нормативній розрахунковій температурі для опалення, мінімальне значення якої в Україні складає $t_{np} = (-25)$ °C. Як показали розрахунки, для отримання нормальних умов у приміщенні, обладнаному електропідлогою такої конструкції, необхідна денна підтопка одним верхнім кабелем протягом 4 годин.

В експериментах з підтопкою верхнім кабелем чи електроконвектором використовувалася одна і та сама система автоматичного регулювання по температурі внутрішнього повітря, перевагою якої є ідентичні умови дослідів і можливість порівняння їхніх результатів.

Умови експериментів, уточнені після обробки результатів дослідів 1 (підтопка верхнім кабелем) і дослідів 2 (підтопка електроконвектором), наведені в таблиці.

Таблиця

Фактичні значення температур зовнішнього і внутрішнього повітря в експериментах з підтопкою при $t_{np} = (-25)^\circ\text{C}$

Параметр	Середні значення у досліді
<i>Дослід 1, акумуляційно-переривчастий режим з підтопкою верхнім кабелем при $t_{np} = -25^\circ\text{C}$</i>	
Середня температура підлоги за період використання приміщення, $^\circ\text{C}$	24,49
Середня температура зовнішнього повітря t_n , $^\circ\text{C}$	-24,08
Середня температура внутрішнього повітря, $^\circ\text{C}$	18,82
<i>Дослід 2, акумуляційно-переривчастий режим з підтопкою електроконвектором при $t_{np} = -25^\circ\text{C}$</i>	
Середня температура підлоги за період використання приміщення, $^\circ\text{C}$	24,28
Середня температура зовнішнього повітря, $^\circ\text{C}$	-24,16
Середня температура внутрішнього повітря, $^\circ\text{C}$	19,05

Результати експериментів у графічній формі наведені на рис. 1, де показані температури внутрішнього повітря (крива 1) і поверхні підлоги (крива 2), і на рис. 2, де зіставлені надходження теплоти від підлоги (крива 3) і внутрішніх стін у дослідів 1 і 2. Порівняльний аналіз наведених даних показує:

1. Експерименти були проведені практично в рівних умовах. Проте у цих дослідів істотно розрізнялася споживана електрична потужність. Незважаючи на те, що автоматичне регулювання підтопки здійснювалося в обох дослідів тим самим регулятором, налагодженим на підтримку однієї і тієї самої температури повітря усередині приміщення, однак після включення в роботу верхнього кабелю протягом 4 годин не відбулося жодного його вимикання. Це пояснюється тим, що збільшення температури внутрішнього повітря в приміщенні при підтопці верхнім кабелем відбувалося настільки повільно, що за час дослідів не відбулося перевищення межі чутливості регулятора (близько $0,7^\circ\text{C}$). Спожита електроенергія за час підтопки склала $3,34$ кВт·год, позиція 5, див. рис. 2.

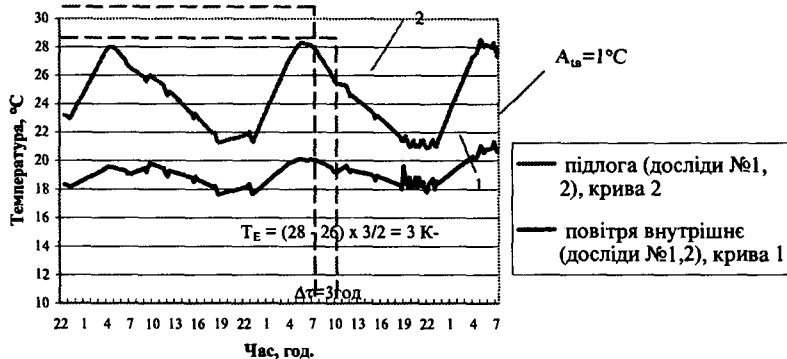


Рис. 1. Температури підлоги і повітря: експеримент при $t_n = -25^\circ\text{C}$, підтопка верхнім кабелем (ліворуч) або конвектором (праворуч)

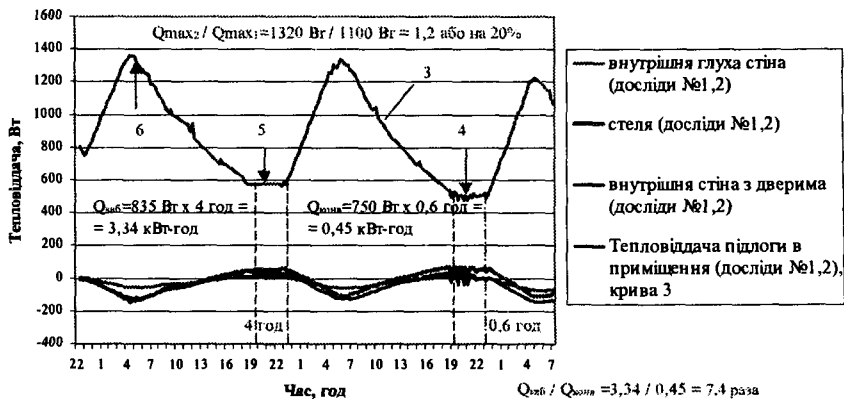


Рис. 2. Тепловіддача підлоги і внутрішніх стін: експеримент при $t_n = -25^\circ\text{C}$, підтопка верхнім кабелем (ліворуч) або конвектором (праворуч)

При підтопці конвектором безпосередній час роботи включеного конвектора споживаною потужністю 750 Вт склав 0,6 години. Таким чином, витрачена на підтопку кількість електроенергії дорівнювала 0,45 кВт-год, позиція 4, рис. 2, що в 7,4 рази менше, ніж для верхнього кабелю. Причинами цього факту є те, що при підтопці верхнім кабелем значна частина енергії витрачається на нагрівання маси підлоги. Після включення підтопки верхнім кабелем у кілька разів зростає градієнт температур між поверхнею кабелю і всіма іншими елементарними об'ємами теплоакуючого шару, незалежно від того, де ці об'єми розташовані – над кабелем чи під ним. Тому теплота передається від

кабелю, що гріє, в усі сторони, розподіляючись по всій масі підлоги, і тільки її невелика частина віддається в приміщення.

2. Нами була виконана експериментальна перевірка можливості дотримання норм DIN 44576 по температурі поверхні підлоги житлових приміщень для найгірших кліматичних умов України, що відповідають мінімальній розрахунковій температурі для опалення зовнішнього повітря $t_{н} = -25$ °С. Результати дослідів з удосконаленою ЕКСО з денною підтопкою електроконвектором наведені на рис. 1 праворуч.

Нагрівання підлоги включалося в 23 години. Приблизно в 5:30 температура її поверхні досягала 28 °С і регулятор починав працювати в режимі почергового вмикання-вимикання, з інтервалом близько 25 хв. У 7 годин ранку подача електроенергії в систему нагрівання припинялася, і до 23 годин підлога охолоджувалась. Коли температура повітря в приміщенні знижувалася до 18 °С, автоматично включався конвектор, періодичність умикання-вимикання якого складала 25–30 хв. Загальна тривалість періоду денної підтопки дорівнювала 4 години, з них безпосередній час роботи включеного конвектора був менше 0,6 години.

Якщо проаналізувати отримані результати в зіставленні з рекомендаціями DIN 44576, то в період використання приміщення, тобто з 7 до 22 годин, мала місце надмірна температура $\theta_{F_{\max}} = 28$ °С, тривалість дії цієї надмірної температури склала $\Delta\tau = 3$ години, з 7 до 10 годин ранку. Звідси знаходимо нормативний параметр $T_E = (\theta_{F_{\max}} - \theta_{\text{порівн}}) \cdot \Delta\tau/2 = (28 - 26) \cdot 3/2 = 3$ К·год, що задовольняє нормам DIN 44576 [3] $T_E \leq 4$ К·год.

Потрібно також відзначити, що амплітуда коливань температури повітря в даному експерименті склала $A_{\text{тв}} = \pm 1$ °С. Отже, за показниками комфортності приміщення з ЕКСО істотно краще, ніж це допускається діючими нормами для акумуляційно-переривчастого (наприклад, пічного, ТАП і т. п.) опалення, і в розрахункових для України умовах задовольняє західним санітарним нормам, зокрема, наведеним у DIN 44576.

Отриманий досвід випробувань в умовах, наближених до реальних, використаний при розробці вітчизняної нормативно-технічної бази, необхідної для оснащення житлових приміщень ЕКСО-ТА.

3. При аналізі результатів дослідів з підтопкою верхнім кабелем і конвектором, виконаними при мінімальній для України розрахунковій для опалення температурі зовнішнього повітря $t_{нр} = -25$ °С, звертає на себе увагу те, що в порівнянні з такими ж дослідями, у яких температура зовнішнього повітря була істотно вищою і складала близько -10 °С, не відбулося збільшення витрат електроенергії на підтопку, а навпаки, ці витрати навіть трохи знизилися:

- верхнім кабелем у $5,0 \text{ кВт} / 3,34 \text{ кВт} = 1,5$ раза;
- електроконвектором у $1,5 \text{ кВт} / 0,45 \text{ кВт} = 3,3$ раза.

Це є наслідком збільшення товщини електропідлоги й інших удосконалень її конструкції.

4. Якщо зіставити експериментальні дані по тепловіддачі підлоги в приміщення в аналогічних дослідах з 90-мм підлогою ($Q_1 = 1080 \text{ Вт}$, [1]), і з 160-мм ($Q_2 = 1300 \text{ Вт}$, позиція 6, див. рис. 2), неважко бачити, що під час підтопки тепловіддача підлоги в приміщення в останньому випадку приблизно на 20% вища ($1300 \text{ Вт} / 1080 \text{ Вт} = 1,2$ раза), що є прямим наслідком зробленої зміни конструкції електропідлоги. Звідси виникає питання, які ж граничні можливості удосконаленої підлоги, якщо її використовувати в найпростішому варіанті, без підтопки. Результати експериментальних досліджень такого варіанта показали температуру зовнішнього повітря $t_{н.п} = -20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Таким чином, у результаті виконаного збільшення товщини теплоакумуючого шару до 160 мм і додаткової теплової ізоляції по периметру шару, що акумулює, істотно підвищені теплоакумуляційні властивості електропідлоги і відповідно знижена максимальна температура її поверхні в акумуляційно-переривчастому режимі.

Удосконалена конструкція може бути використана при розрахункових температурах зовнішнього повітря нижче $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ – за рахунок 8-годинної нічної зарядки електропідлоги в комбінації з денною автоматичною комфортною підтопкою, що включається на короткий час в залежності від температури зовнішнього повітря.

Через те що в Україні витрати енергії на опалення денною підтопкою при температурах зовнішнього повітря нижче $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ незначні, вибір методу підтопки при акумуляційно-переривчастому опаленні приміщення електропідлогою удосконаленої конструкції практично не впливає на техніко-економічні показники системи.

Використана література

1. Черних Л. Ф. Фізико-математична модель теплового режиму приміщення з електротеплоакумуляційною системою опалення підлогою, що гріє. – Будівництво України, 2002, № 5. – С. 36–39.
2. 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.
3. DIN 44576. Электрическое отопление помещений. Аккумуляционное отопление нагретым полом. Немецкий стандарт. ДК 697. 278: 692.53:001.4. Март 1987 г.