

# I. УПРАВЛІНСЬКІ, ЕКОЛОГІЧНІ, ЕКОНОМІЧНІ ТА ПРАВОВІ АСПЕКТИ ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

УДК 697.12; 628.87

**БАСОК Б. І.**, член-кореспондент НАН України, докт. техн. наук, професор,  
**ДАВИДЕНКО Б. В.**, докт. техн. наук,  
**ГОНЧАРУК С. М.**, канд. техн. наук,  
**НОВІЦЬКА М. П.**, канд. техн. наук,  
Інститут технічної теплофізики НАН України

## ТЕПЛОФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМУ БУДІВЛІ

***Анотація.** У статті наведено результати чисельного моделювання температурного режиму будівлі в цілому. Задача розглядається в стаціонарній та нестационарній постановках. Результати теоретичного розрахунку з використанням розробленої наближеної теплофізичної моделі температурного режиму будівлі задовільно узгоджуються з даними експериментальних досліджень.*

***Ключові слова:** тепловтрати, тепловий режим, будівля, енергоменеджмент, теплофізичне моделювання.*

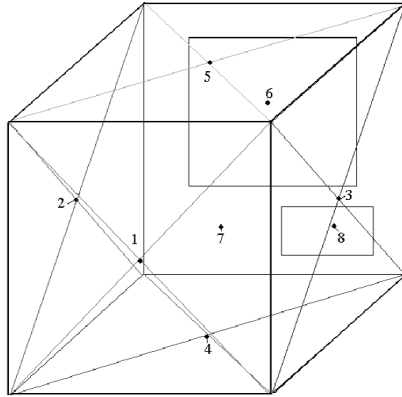
***Abstract** The article presents the results of numerical modeling of the temperature regime of the building as a whole. The problem is considered in the stationary and non-stationary formulations. The results of the theoretical calculation using the developed approximate thermal-physical model of the temperature regime of the building are satisfactorily consistent with the data of experimental studies.*

***Keywords:** heat loss, thermal regime, building, energy management, thermophysical simulation.*

Перевірка теплового стану огорожувальних конструкцій (ОК), ефективності роботи систем опалення та вентиляції будівель, а також визначення параметрів мікроклімату приміщень будівлі може здійснюватися шляхом тепловізійного обстеження, натурального експерименту або теплофізичного моделювання. Інфрачервоне обстеження дає можливість виявлення зон з погіршеною теплоізоля-

цією ОК та аналізу роботи систем вентиляції та опалення. Його застосування проводять для виявлення місць розташування ділянок з тепловими відмовами та локалізації зон надмірної інфільтрації повітря крізь огорожувальні конструкції. Але за допомогою тепловізійної діагностики не можливо визначити якість теплової ізоляції та повітропроникності конструкцій. Для кількісного визначення тепловтрат через стінові та світлопрозорі конструкції необхідно проводити обстеження іншими методами та приладами. Методи для визначення якості теплової ізоляції встановлено у таких стандартах: ДСТУ Б В.2.6-101:2010 Конструкції будинків і споруд. Метод визначення опору теплопередачі огорожувальних конструкцій; ДСТУ Б В.2.2-19:2007 Будинки і споруди. Метод визначення повітропроникності в натурних умовах тощо. Ефективним та економічним способом дослідження теплових режимів будівель є теплофізичне чисельне моделювання. Числові методи досліджень теплових процесів можуть бути використані для дослідження тепломасопереносу, температурних полів та ступеня комфортності перебування людей в приміщеннях різних конструкцій та з різними системами опалювання. Саме дослідження теплового режиму будівлі в цілому з використанням теплофізичного моделювання проводяться та аналізуються в даній роботі.

У роботах [1—3] наведено результати розрахунку температурного режиму приміщення з конвекторною системою опалення, що одержані з розв'язання тривимірної системи рівнянь гідродинаміки та теплопереносу. Для спрощеного розв'язання такої задачі використана наближена теплофізична модель приміщення з зосередженими параметрами. Згідно з цією моделлю, в досліджуваному приміщенні розглядаються окремі теплообмінні поверхні, температури яких вважаються однорідними. Кожній з таких поверхонь ставиться у відповідність деякий розрахунковий вузол, значення температури в якому відповідає усередненій по площі температурі поверхні, що розглядається (рис. 1). Нумерація вузлів прийнята з урахуванням того, що температури протилежної від вікна стіни, підлоги, стелі, а також лівої та правої стіни наближено вважаються рівномірно розподіленими по поверхнях. Водночас температури віконного скла, законвекторної ділянки та іншої частини зовнішньої та внутрішньої поверхні зовнішньої стіни можуть між собою істотно відрізнятись. Тому на зовнішній стіні розглядаються три характерні зони з внутрішньої сторони та три зони з зовнішньої сторони.



**Рис. 1. Номера розрахункових вузлів в схемі з зосередженими параметрами  
Номери вузлів встановлено у такий спосіб:**

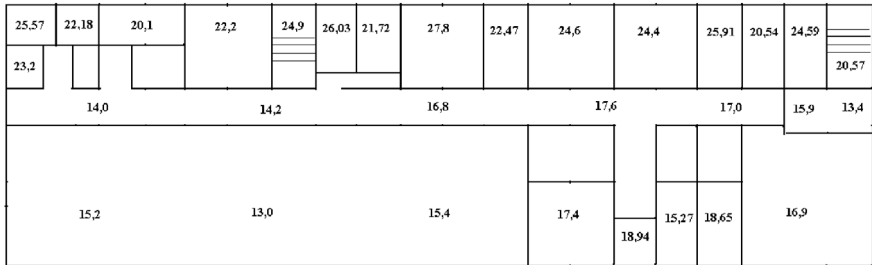
1 — стіна, протилежна віконній конструкції; 2 — ліва від вікна стіна; 3 — права від вікна стіна; 4 — підлога; 5 — стеля; 6 — внутрішня поверхня вікна; 7 — ділянка внутрішньої поверхні зовнішньої стіни, що не належить до вікна і законвекторній ділянці; 8 — законвекторна ділянка внутрішньої поверхні зовнішньої стіни, біля якої розміщений конвектор. Площа законвекторної ділянки приймається рівною площі конвектора. 9 — зовнішня поверхня вікна; 10 — ділянка зовнішньої поверхні зовнішньої стіни, що не належить до вікна і законвекторної ділянки; 11 — законвекторна ділянка на зовнішній поверхні зовнішньої стіни

Номер 12 присвоєно вузлу, який характеризує температуру повітря в приміщенні. Температура повітря в приміщенні наближено вважається однорідною.

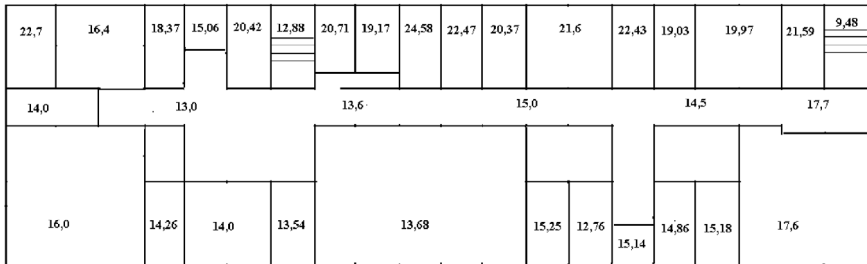
Згідно з прийнятими припущеннями про теплообмін між різними поверхнями в приміщенні вважається, що променевий тепловий потік від конвектора надходить до стіни, що протилежна вікну ( $Q_{k-1}^{\text{пром}}$ ); до лівої ( $Q_{k-2}^{\text{пром}}$ ) та правої ( $Q_{k-3}^{\text{пром}}$ ) бічних стін; до підлоги ( $Q_{k-4}^{\text{пром}}$ ); до стелі ( $Q_{k-5}^{\text{пром}}$ ), а також до законвекторної ділянки зовнішньої стіни ( $Q_{k-8}^{\text{пром}}$ ). Крім того вважається, що променевий тепловий потік до поверхні вікна надходить від стіни, що протилежна вікну ( $Q_{6-1}^{\text{пром}}$ ); від лівої ( $Q_{6-2}^{\text{пром}}$ ) та правої ( $Q_{6-3}^{\text{пром}}$ ) бічних стін; від підлоги ( $Q_{6-4}^{\text{пром}}$ ) та від стелі ( $Q_{6-5}^{\text{пром}}$ ). До ділянки зовнішньої стіни (без вікна і законвекторної ділянки) променевий тепловий потік також надходить від стіни, що протилежна вікну ( $Q_{7-1}^{\text{пром}}$ ); від лівої бічної стіни ( $Q_{7-2}^{\text{пром}}$ ) та правої бічної стіни ( $Q_{7-3}^{\text{пром}}$ ); від підлоги ( $Q_{7-4}^{\text{пром}}$ ) та від стелі ( $Q_{7-5}^{\text{пром}}$ ). Конвекційний теплообмін відбувається між повітряним середовищем в приміщенні та: стіною, що протилежна вікну ( $Q_{12-1}^{\text{пром}}$ );

лівою бічною стіною ( $Q_{12-2}^{\text{пром}}$ ); правую бічною стіною ( $Q_{12-3}^{\text{пром}}$ ); підлогою ( $Q_{12-4}^{\text{пром}}$ ); стелею ( $Q_{12-5}^{\text{пром}}$ ); вікном ( $Q_{12-6}^{\text{пром}}$ ); ділянкою зовнішньої стіни (без вікна і законвекторної ділянки) ( $Q_{12-7}^{\text{пром}}$ ); законвекторною ділянкою зовнішньої стіни ( $Q_{12-8}^{\text{пром}}$ ); конвектором ( $Q_{12-к}^{\text{пром}}$ ).

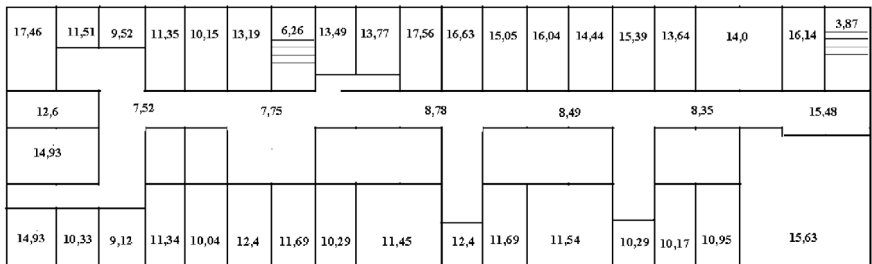
З використанням представленої методики розрахунку були проведені чисельні дослідження повітряно-температурного режиму будівлі ІТТФ НАН України (м. Київ, вул. Булаховського 2) у зимовий період (рис. 2).



Перший поверх



Другий поверх



Третій поверх

**Рис. 2. Розподіл температури (°C) в приміщеннях (що окреслені прямокутниками) поверхів досліджуваної будівлі при  $t_{\infty} = -15,5^{\circ}\text{C}$ ;  $t_{\text{вх.ос}}^{\text{вх.ос}} = 86,6^{\circ}\text{C}$ ;  $G_{\text{тн}}^{\text{вх.ос}} = 3,25 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $v_0 = 5 \text{ м/с}$ , вітер — південний**

На рис. 2 представлені значення температури в кожному при-  
міщенні будівлі за таких стаціонарних умов: температура зовніш-  
нього повітря:  $t_{\infty} = -15,5^{\circ}\text{C}$ ; температура теплоносія на вході в си-  
стему теплопостачання будівлі  $t_{\text{TH}}^{\text{вх.оц}} = 86,6^{\circ}\text{C}$ ; витрата теплоносія  
в системі опалення  $G_{\text{TH}}^{\text{вх.оц}} = 3,25 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Розрахунки проведено для  
швидкості незбуреного вітрового потоку  $v_0 = 5 \text{ м/с}$ . Напрямок  
вітру — південний (поперечний до фасаду споруди).

Результати розрахунку розподілу коефіцієнтів тиску вітрового  
потоку  $K_p$  по поверхні ОК, що характерні для розглянутого випад-  
ку, представлені в роботах [4—7]. Ці дані використано для розра-  
хунку неорганізованого припливу (проникнення) повітря через  
нешільності в ОК. Величини коефіцієнтів тепловіддачі на зовніш-  
ніх поверхнях ОК будівлі, що характерні для розглянутого випад-  
ку, знайдені з використанням методу, розглянутого в [4—7]. Резуль-  
тати розрахунку температур конвекторів для північно-східної гілки  
системи опалення будівлі представлені в табл. 1. Результати розра-  
хунків втрат теплоти для досліджуваної будівлі наведено в табл. 2.

Таблиця 1

**Результати розрахунків температур ( $^{\circ}\text{C}$ ) конвекторів  
для північно-східної гілки**

Номер контуру опалювальних приладів	Номер конвектора в контурі					
	1	2	3	4	5	6
1	82,84	76,30	70,34	64,71	59,84	55,47
2	82,05	75,15	69,10	63,41	58,53	53,97
3	81,15	73,85	67,51	61,57	56,54	51,88
4	80,28	72,78	66,26	60,18	55,05	50,41
5	79,71	72,83	66,72	60,77	55,44	50,59
6	78,22	71,50	65,54	60,10	55,61	51,82

Таблиця 2

**Результати розрахунків теплових втрат досліджуваної будівлі**

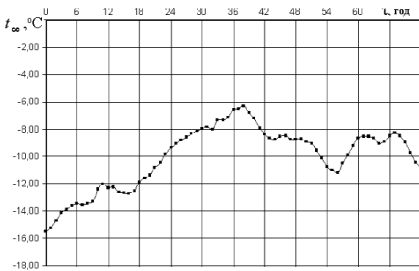
$G_{\text{прит.}}$ , $\text{м}^3/\text{год}$	$Q_{\text{інф}}$ , кВт	$Q_{\text{ок}}$ , кВт	$Q_{\text{сум}}$ , кВт
1784	24,5	96,65	121,14

За розглянутою методикою досліджувалася динаміка температурного режиму будівлі при змінних у часі значеннях температури зовнішнього повітря. В якості вихідних даних для розрахунку були використані результати вимірювання за певний період часу температури зовнішнього повітря, температури і витрати теплоносія на вході в систему опалення будівлі, що досліджується. Зазначені дані у вигляді графічних залежностей відповідних величин від часу представлені на рис. 3—5. Розрахунки проведені для тих же значень швидкості і напрямку вітру, як і для випадку стаціонарного режиму. Швидкість і напрямок вітру в розглянутій період часу вважалися постійними. В результаті розрахункових досліджень визначалися залежності від часу температури теплоносія на виході з системи опалення будівлі, а також його сумарні тепловтрати. Отримані розрахунковим шляхом значення температури теплоносія на виході з системи опалення порівнювалися з даними вимірювань (рис. 6). Як видно з рисунку, розрахункові значення температур теплоносія дещо перевищують експериментальні. Найбільше відхилення спостерігається на початковому періоді, що є наслідком не повної відповідності початкових умов, прийнятих для розрахунку, реальним умовам. З плином часу, у міру зниження впливу початкових умов на результати обчислень, різниця між розрахунковими і експериментальними величинами зменшується. Подібна картина спостерігається також при порівнянні розрахункових значень тепловтрат будівлі та експериментально знайдених величин сумарної потужності опалювальних систем (рис. 7). Сумарна потужність опалювальних систем  $Q_{\text{втр}}$  оцінюється за формулою:

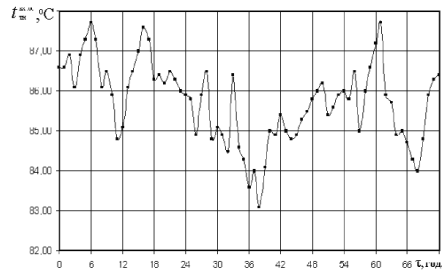
$$Q_{\text{втр}} = G_{\text{тн}}^{\text{вх.ос}} C_p \rho (t_{\text{тн}}^{\text{вх}} - t_{\text{тн}}^{\text{вих}}).$$

В цілому ж слід зазначити, що знайдені розрахунковим шляхом значення тепловтрат виявляються меншими, ніж експериментальні. Причина цього полягає в недостатній точності моделі з зосередженими параметрами, що використовується для розрахунків, в неповній відповідності прийнятих для розрахунку даних по термічним і гідравлічним опорах, а також у неповному обліку всіх наявних тепловтрат будівлі. Слід також зазначити, що експериментальні значення тепловтрат, що визначаються за сумарною потужністю системи опалення, відповідають їм лише в умовах стаціонарного режиму. При нестационарному режимі теплота, отримана від опалювальної системи, витрачається також на зміну теплоємності будівельних конструкцій, а не тільки втрачається в навко-

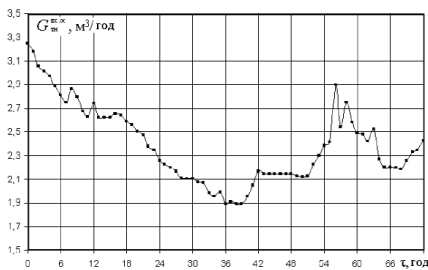
лишній простір. На рис. 8 представлені криві, що відображають відношення тепловтрат через ОК (1), та тепловтрат за рахунок повітрообміну (2) до сумарних тепловтрат. З порівняння вказаних кривих випливає, що втрати за рахунок повітрообміну складають від 20 % до 30 % від сумарних тепловтрат. На рис. 9 представлено порівняння інтегральних втрат теплоти крізь бічні (вертикальні) поверхні ОК. Крива 1 відповідає тепловтратам через стіни, а крива 2 — через вікна. З порівняння представлених на рисунку результатів випливає, що хоча сумарна площа стін відноситься до сумарної площі вікон як 5:4, втрати теплоти через віконні конструкції суттєво перевищують втрати теплоти через стіни внаслідок більш низького термічного опору вікон.



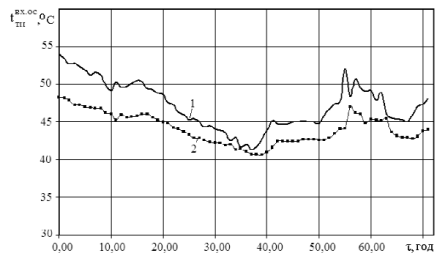
**Рис. 3. Зміна в часі температури зовнішнього повітря з 4 по 7 лютого 2012 р.**



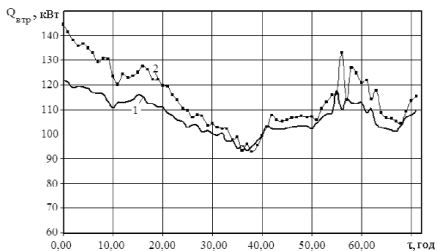
**Рис. 4. Зміна в часі температури теплоносія на вході в опалювальну систему з 4 по 7 лютого 2012 р.**



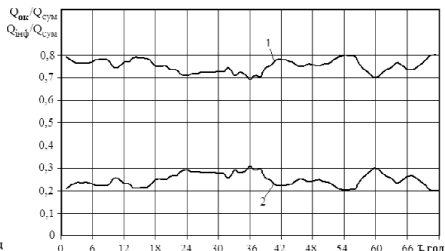
**Рис. 5. Зміна в часі витрати теплоносія на вході в опалювальну систему з 4 по 7 лютого 2012 р.**



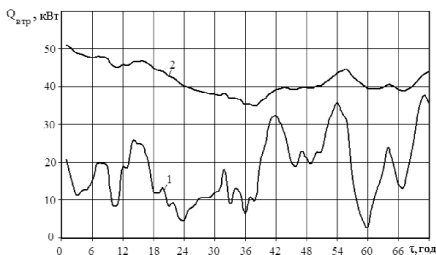
**Рис. 6. Зміна в часі температури теплоносія на виході з опалювальної системи з 4 по 7 лютого 2012 р.: 1 — теорія; 2 — експеримент**



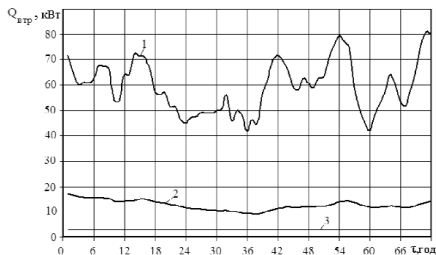
**Рис. 7. Залежність від часу сумарних теплових витрат будівлі з 4 по 7 лютого 2012 р.:**  
1 — розрахунок; 2 — експеримент



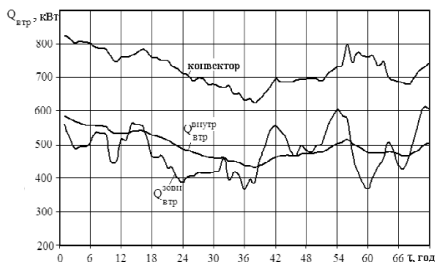
**Рис. 8. Відношення тепловитрат через огорожувальні конструкції (1) та за рахунок інфільтрації (2) до сумарних тепловитрат будівлі з 4 по 7 лютого 2012 р.**



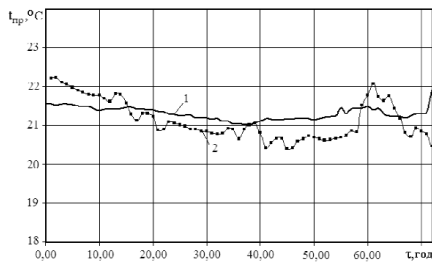
**Рис. 9. Зміна в часі тепловитрат через бічні стіни (1) та вікна (2) в будівлі з 4 по 7 лютого 2012 р.**



**Рис. 10. Тепловитрати через бічні огорожі (стіни та вікна (1)), дах (2) та фундамент (3) з 4 по 7 лютого 2012 р.**

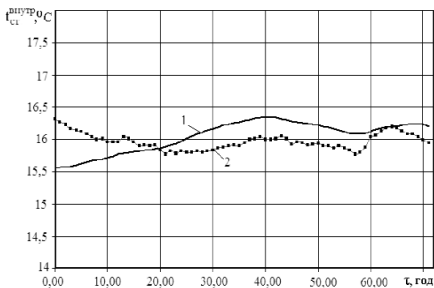


**Рис. 11. Тепловиділення від конвектора та тепловитрати через зовнішню та внутрішню поверхню зовнішньої стіни приміщення з 4 по 7 лютого 2012 р.**



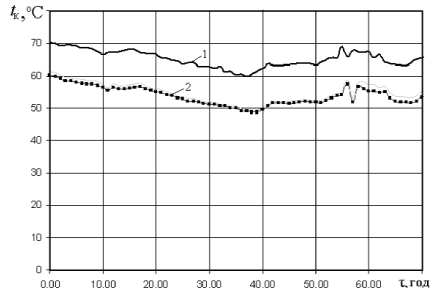
**Рис. 12. Зміна в часі температури повітря в приміщенні з 4 по 7 лютого 2012 р.:**  
1 — розрахунок; 2 — експеримент





**Рис. 13.** Зміна в часі температури внутрішньої поверхні зовнішньої стінової конструкції приміщення досліджуваної будівлі з 4 по 7 лютого 2012 р.:

1 — розрахунок; 2 — експеримент



**Рис. 14.** Зміна в часі температури теплоносія (1 — розрахунок) та температури поверхні конвектора (2 — експеримент) в окремому приміщенні досліджуваної будівлі з 4 по 7 лютого 2012 р.

Порівняння тепловтрат через бічні огорожі, дах та фундамент представлені на рис. 10. З рисунку видно, що втрати теплоти через бічні поверхні значно перевищують аналогічні показники для даху та фундаменту. Мінімальні втрати через фундамент обумовлені тим, що під будівлею утворюється область, в якій температури несуттєво відрізняються від температур на першому поверсі будівлі. Ця область не схильна до впливу вітру і частково теплоізолювана від навколишнього середовища самою будівлею. На глибині 2—3 метри від земної поверхні температурні умови стабільні протягом цілого року.

Крім розглянутої вище динаміки температурного режиму всього корпусу додатково наведені результати чисельних досліджень температурного режиму окремого приміщення досліджуваної будівлі, в якому були встановлені термометри опору і перетворювачі теплового потоку на зовнішній стіні.

Зміна в часі потужності конвектора, а також зміна в часі теплових потоків на внутрішній і зовнішній поверхнях зовнішньої стіни представлено на рис. 11. Як видно з рисунку, теплові потоки через зовнішню стіну на 200—250 Вт нижчі, ніж потужність конвектора. Це пов'язано з тим, що частина потужності конвектора витрачається на променевий тепловий потік до внутрішніх стін цього приміщення, а також на конвективний нагрів повітря в приміщенні. Ці теплові потоки переносяться теплопровідністю та конвекцією до сусідніх приміщень та в коридор. Різниця ж у зна-

ченнях теплових потоків на зовнішній і внутрішній поверхнях зовнішньої стіни пов'язана з тим, що при нестационарному режимі теплообміну частина теплоти, що надходить до внутрішньої поверхні, витрачається на збільшення тепловмісту самої стіни. Порівняння розрахункових результатів з експериментальними даними щодо зміни в часі температури повітряного середовища в приміщенні, а також температури внутрішньої поверхні зовнішньої стіни, представлені на рис. 12 і 13. Порівняння розрахункових результатів з експериментальними даними показує їх задовільне узгодження (відмінність в межах  $0,5^{\circ}\text{C}$ ).

На рис. 14 представлено змінення в часі температури теплоносія в конвекторі, встановленому в досліджуваному приміщенні, а також визначеної з експерименту температури зовнішньої поверхні конвектора. Як видно з порівняння вказаних залежностей, вони якісно подібні. Кількісна різниця між представленими даними (порядку  $10^{\circ}\text{C}$ ) зумовлена наявністю термічного опору стінки конвектора, і тим, що встановлений на зовнішній поверхні конвектора термометр опору не був теплоізолюваний від зовнішнього середовища приміщення, і, внаслідок цього, віддавав повітряному середовищу теплоту, отриману від конвектора. Фактично цей датчик показував середнє значення між температурою стінки конвектора і температурою пристінкового граничного шару повітря навколо конвектора.

**Висновок.** У результаті було вдосконалено чисельну модель теплопереносу всередині адміністративної будівлі. Розроблено наближений метод чисельного аналізу температурного стану повітряного середовища, ОК та системи опалення адміністративної будівлі, що ґрунтується на вирішенні задачі теплопереносу з зосередженими параметрами. З використанням даного методу проведено аналіз динаміки температурного режиму адміністративної будівлі в зимовий період року, визначено рівні тепловтрат з поверхонь його огорожувальних конструкцій, а також за рахунок інфільтрації. Знайдено характерні особливості розподілу температури в будівлі залежно від розміщення приміщень в її загальному об'ємі.

### Література

1. Басок Б. І. Конвективний коефіцієнт тепловіддачі на зовнішній поверхні огорожувальної конструкції будівлі / Б. І. Басок, С. М. Гончарук, Б. В. Давиденко, М. П. Новіцька, Т. А. Резакова // Будівельні конструкції. — 2013. — В. 77. — С. 174—178.

2. Гончарук С. М. Дослідження аеродинаміки будівлі / С. М. Гончарук, Б. В. Давиденко, Є. В. Шевель // Збірка тез доповідей VII Міжнародної науково-практичної конференції аспірантів, магістрантів і студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики». 25—28 квітня 2009 р., НТУУ «КПІ», м. Київ, Україна. — С. 58.

3. Басок Б. И. Аэродинамика и теплоотдача с поверхности ограждающих конструкций трехэтажного административного здания / Б.И. Басок, Б.В. Давыденко, М.П. Новицкая, С.М. Гончарук // XIV Минский международный форум по тепло- и массообмену: Тезисы докладов и сообщений (Минск, 10—13 сентября 2012 г.) Минск: Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова, 2012. — С. 44—45.

4. Басок Б. И. Температурный режим отопляемого помещения. Приближенная теплофизическая модель / Б. И. Басок, Б. В. Давыденко, С. М. Гончарук, О. М. Лысенко // Промышленная теплотехника. — 2013. — Т. 35, № 4. — С. 23—30.

5. Басок Б. И. Эффективность прерывистого режима отопления помещений / Б. И. Басок, Б. В. Давыденко, С. М. Гончарук, О. Н. Лысенко // Промышленная теплотехника. — 2013. — Т. 35, № 6. — С. 39—46.

6. Басок Б. І. Теплофізичне моделювання повітряно-температурного режиму приміщення громадської будівлі при переривчастому режимі опалення / Б. І. Басок, Б. В. Давиденко, С. М. Гончарук, О. М. Лисенко // Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку. Збірник тез доповідей. — 2014. — С. 21.

7. Басок Б. И. Теплофизическое моделирование температурного режима здания (на примере административного корпуса ИТТФ НАН Украины) / Б. И. Басок, Б. В. Давыденко, Н. П. Новицкая, С. М. Гончарук, О. Н. Лысенко // Збірник тез доповідей IX Міжнародної конференції «Проблеми промислової теплотехніки», м. Київ, Україна, 20—23 жовтня 2015 р. [електронний ресурс].

**Інформація про авторів** Басок Б. І. basok@ittf.kiev.ua, Давиденко Б. В. bdavydenko@ukr.net, Гончарук С. М. goncharuk-s@ukr.net, Новицька М. П. mmarina@ukr.net