

Моделювання теплообміну енергоефективної будівлі

Наталя Болгарова¹, Віталій Плоский², Володимир Скочко³

Київський національний університет будівництва і архітектури
31, просп. Повітрофлотський, Київ, Україна, 03037,
¹ruchinsky@ukr.net, orcid.org/0000-0002-4818-9493
²ploskyivo@ukr.net, orcid.org/0000-0002-2632-8085
³vladimir.and.friends@gmail.com, orcid.org/0000-0002-1709-2621

DOI: 10.32347/2310-0516.2018.11.7-21

Анотація. В процесі проектування енергоефективних будинків особливої уваги потребує дослідження балансу енергонадходжень та енерговтрат. Це пояснюється тим, що потреба у забезпеченні будинку енергетичними ресурсами може стати ключовим питанням у визначенні його сумарної площі приміщень та вплинути на результуючі об'ємно-планувальні рішення. Окрім того, вкрай важливо мати можливість точно оцінювати величини енерговитрат, що відбуватимуться в огорожувальних конструкціях та інженерних системах майбутнього будинку, з метою їх мінімізації ще на етапі виконання проектних робіт. Для вирішення цієї задачі необхідно мати гнучкий та наочний апарат моделювання процесів теплообміну та відповідну математичну інструментальну базу, що дозволить враховувати вплив режимів роботи усіх інженерних систем (включаючи системи опалення, вентиляції та кондиціонування) у різні пори року, а також даватимуть змогу легко змінювати початкові та крайові умови розрахунків, а саме: конфігурації зовнішніх і внутрішніх стін, перекриттів та покриттів, кількість та місця розміщення світлопрозорих конструкцій, а також можливі дефекти та нещільності огорожувальних конструкцій, в результаті яких виникатимуть інфільтраційні процеси, що впливатимуть на кратність повітрообміну приміщень та тепловтрати будівлі у цілому.

В даній роботі розглядається математичний апарат моделювання стаціонарного температурного режиму будівлі, що базується на комплексному системному розрахунку температур на поверхнях та у повітрі внутрішніх приміщень, із урахуванням теплофізичних параметрів



Наталя Болгарова
асистент кафедри
архітектурних конструкцій



Віталій Плоский
професор кафедри
архітектурних конструкцій
д.т.н., проф.



Володимир Скочко
доцент кафедри
архітектурних конструкцій
к.т.н., доц.

матеріалів стінових конструкцій, вікон та дверей, теплонадходжень від системи опалення та інших джерел енергії, а також параметрів роботи системи вентиляції.

Продемонстровано приклад складання системи теплового балансу приміщень енергоефективного житлового будинку котеджного типу. Показано принципи врахування усіх видів теплообміну між поверхнями та повітряним середовищем кімнат, а також прогнозовані зниження опорів теплопередачі огорожувальних конструкцій, пов'язане з формою будівлі.

Ключові слова. Енергоефективність, системні розрахунки, тепловий баланс, огорожувальні конструкції.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

На сьогоднішній день в галузі проектування та зведення енергоефективних будівель спостерігається значне погиршення, спричинене підвищенням вимог до новобудов та вже існуючого житлового фонду щодо їх рівня споживання енергоресурсів. В результаті цього державні будівельні норми стають більш вимогливими за рахунок інтегрування в них міжнародних та європейських стандартів, а також внаслідок дотримання директив, що передбачають інтенсифікацію контролю якості та відповідності характеристик використаних в процесі будівництва матеріалів, конструкцій, виробів та обладнання необхідному рівню енергоспоживання та енергоефективності.

Як наслідок, засоби та методики проектування стають значно складнішими, оскільки повинні передбачати урахування багатьох факторів і параметрів варіювання в будівлі, як у складній багатокомпонентній системі. Однак, дуже часто при зростанні складності розрахункових моделей підвищується ймовірність допущення з боку проектувальників механічних помилок, обумовлених великою кількістю розрізних за принципом виконання та обсягом операцій та математичних перетворень, особливо якщо моделі не можна представити у наочній простій формі. Очевидно, наочність та конструктивність розрахункових моделей відіграє важливу роль у їх застосовності, подальшому розвитку та популяризації серед проектувальників та науковців.

Одним із найбільш актуальних завдань при визначенні рівня енергоефективності будівель та споруд є аналіз їх теплового балансу з урахуванням усіх енергонаджень і енерговтрат, оскільки, як правило, найбільші обсяги енергії в холодну пору року витрачаються на опалення експлуатованих приміщень, а в теплу пору року на їх охолодження або кондиціонування. Саме за результатами аналізу теплового балансу будівлі можна визначити необхідні параметри теплової ізоляції та встановити оптимальний режим провітрювання приміщень. А значить подальший розвиток та створення

нових моделей теплового балансу приміщень є важливою й нагальною задачею.

АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Проблема енергоефективного будівництва знаходить відображення у працях, що висвітлюють питання стабільного розвитку енергоефективної архітектури, нового будівництва та реновації [1, 2, 14, 20]. Фундаментальними можна назвати роботи присвячені питанням будівельної фізики [3, 6, 7, 9, 11], математичного та геометричного моделювання [8, 10, 13]. Значна увага дослідників також звернена до обчислення теплопередачі на базі BIM технологій [12]. Ряд досліджень присвячено питанням оптимізації теплопередачі енергоефективних будівель [15, 16, 17, 18, 19]. В роботі [5] було продемонстровано підхід і математичний інструментарій для відтворення температури повітря та поверхонь стін приміщень будівель. Даний підхід базується на методі теплоелектричної аналогії та передбачає побудову дискретної розрахункової моделі досліджуваної будівлі у формі непланарного графу, вершини (вузли) якого представляють собою точки у повітрі та на поверхнях внутрішніх і зовнішніх стін, а ребра (зв'язки) – опори теплопередачі між цими точками. Процес моделювання із застосуванням даного математичного інструменту представляє собою складання рівнянь теплового балансу для кожного з вище зазначених вузлів з подальшим розв'язанням одержаної системи відносно температур у них. Кожне рівняння теплового балансу можна записати у наступній формі:

$$\sum_{j=1}^n K_{i,j} \cdot (t_j - t_i) \pm Q_i = 0, \quad (1)$$

де t_i та t_j – температури у i -й та j -й досліджуваних точках; $K_{i,j}$ – коефіцієнт теплопередачі між i -ю та j -ю точками дискретної розрахункової моделі; Q_i – сума усіх теплонадходжень і тепловтрат у приміщенні або на поверхні стін, включаючи енергію джерел або витоків. Коефіцієнти теплопередачі

визначаються по-різному для різних ділянок середовища будівлі, в залежності від того, яким саме способом здійснюється передача енергії: трансмісійним, конвективним, променевим або змішаним. Ці коефіцієнти розраховуються за формулою:

$$K_{i,j} = \left(1 / \sum_{p=1}^m R_p \right)_{i,j}, \quad (2)$$

де R_p – опір теплопередачі p -го шару конструкції або повітряного середовища (з усіх m шарів), що лежить на перетині траєкторії трансмісійної, конвективної або променевої передачі теплової енергії між i -ю й j -ю точками та для різних випадків становить:

1) при трансмісійній передачі між i -ю й j -ю точками моделі:

$$R_{p_{i,j}} = l_p / (\lambda_p \cdot F_i)_{i,j}; \quad (3)$$

2) при конвективному теплообміні з повітрям у якому розміщено j -ту точку розрахункової моделі:

$$R_{K_j} = 1 / (\alpha_{K_j} \cdot F_i)_{i,j}; \quad (4)$$

3) при променевому теплообміні двох поверхонь:

$$R_{R_{i,j}} = 1 / (C_{i,j} \cdot b_{i,j} \cdot \varphi_{i,j} \cdot F_i)_{i,j}; \quad (5)$$

4) при теплообміні між повітряними масами окремих кімнат (інфільтраційно):

$$R_{L_{i,j}} = 1 / (L_{i,j} \cdot c \cdot \rho)_{i,j}; \quad (6)$$

5) при теплонадходженні або тепловтратах разом із масами повітря, що відповідно поступають або видаляються до приміщень будівлі (інфільтраційно):

$$R_{L_{i,j}} = 1 / (\Delta L_{i,j} \cdot c \cdot \rho)_{i,j}. \quad (7)$$

У формулах (3) – (7) (згідно з [4]): l_p та λ_p –

товщина p -го шару конструкції та коефіцієнт теплопровідності матеріалу відповідно до шару; F_i – площа поверхні поперечного перерізу шару або зовнішньої поверхні конструкції в i -й точці, у якій розпочинається проходження теплової енергії крізь товщу всіх шарів й до досліджуваної j -ї точки; α_{K_j} – коефіцієнт конвективного теплообміну; $C_{i,j}$ – коефіцієнт випромінення поверхні сірого тіла; $b_{i,j}$ – температурний коефіцієнт, який корелює різницю між температурами поверхонь, що обмінюються енергією; $\varphi_{i,j}$ – коефіцієнт опроміненості з j -ї поверхні на i -ту, що виражає частку променевого потоку, що падає на i -ту поверхню з усього потоку від j -ї поверхні; c – показник теплоємності повітря; ρ – густина повітря; $L_{i,j}$ – величина об'ємних витрат повітря, що переміщується від i -ї до j -ї ділянок повітряного простору приміщення за одиницю часу; $\Delta L_{i,j}$ – об'ємна витрата повітря, що видаляється з повітря приміщень або підмішується із зовнішнього повітря з температурою t_i або t_j відповідно.

Окрім того, необхідно, щоб сума об'ємних витрат повітря, яке підмішується до внутрішнього повітря ($\sum \Delta L_{INF}$), дорівнювала сумі об'ємних витрат повітря, що видаляється ($\sum \Delta L_{OUT}$):

$$\sum_q \Delta L_{INF} = \sum_r \Delta L_{OUT}, \quad (8)$$

де q та r – кількості точок надходження та видалення повітря відповідно.

ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

Розглянемо специфіку використання даного підходу на прикладі елементарного одноповерхового будинку котеджного типу з плоскою покрівлею та 3-ма приміщеннями, забезпечення яких повітрям здійснюватиметься із використанням примусової витяжної вентиляції (Рис. 1). Примусову вентиляцію запропоновано для спрощення розрахункової моделі та уникнення додаткових розрахунків, пов'язаних із визначенням напрямків руху та обсягів повітряних пото-

ків, що переміщуватимуться між приміщеннями у разі ускладнення системи вентиляції або при існуванні природної вентиляції в будівлі. За умови наявності лише однієї точки видалення повітряних мас з усієї будівлі, прогнозована траєкторія руху й сумація повітряних мас буде визначатися відповідно до Рис. 1.

Розглядаючи план будинку на Рис. 2, нанесемо досліджувані точки в повітрі (у центрах кімнат), на стелях (що показані на умовних фрагментах покриття) та на внутрішніх поверхнях усіх стін або фрагментів стін, у випадку, якщо, наприклад, внутрішня стіна однієї кімнати є суміжною одразу з декількома іншими кімнатами на іншій стороні даної стіни. Такі вузли позначатимемо кругами. Також нанесемо на плані вузли у повітрі зовнішнього середовища та у вентиляційному каналі примусової вен-

тиляції, що представлятимуть собою крайові умови моделювання. Такі вузли позначатимемо квадратами. З'єднаємо нанесені вузли між собою за принципами, продемонстрованими в [5], таким чином, щоб побудовані зв'язки відображали усі можливі шляхи теплообміну між поверхнями стін будинку, а також повітряними масами в середині й поза його межами. Одержимо дискретну розрахункову модель досліджуваного будинку з різними типами зв'язків між вершинами (див. Рис. 2). Всередині будівлі інфільтраційні потоки повітря, що потраплятиме крізь вікна та зовнішні двері, переміщуватимуться у наступному порядку (з урахуванням прийнятої кратності повітрообміну $n = 0.6$, при висоті приміщень $h = 3$ м, та заданих із практичного досвіду розподілах надходження повітря з вікон та дверей k_i у долях одиниці):

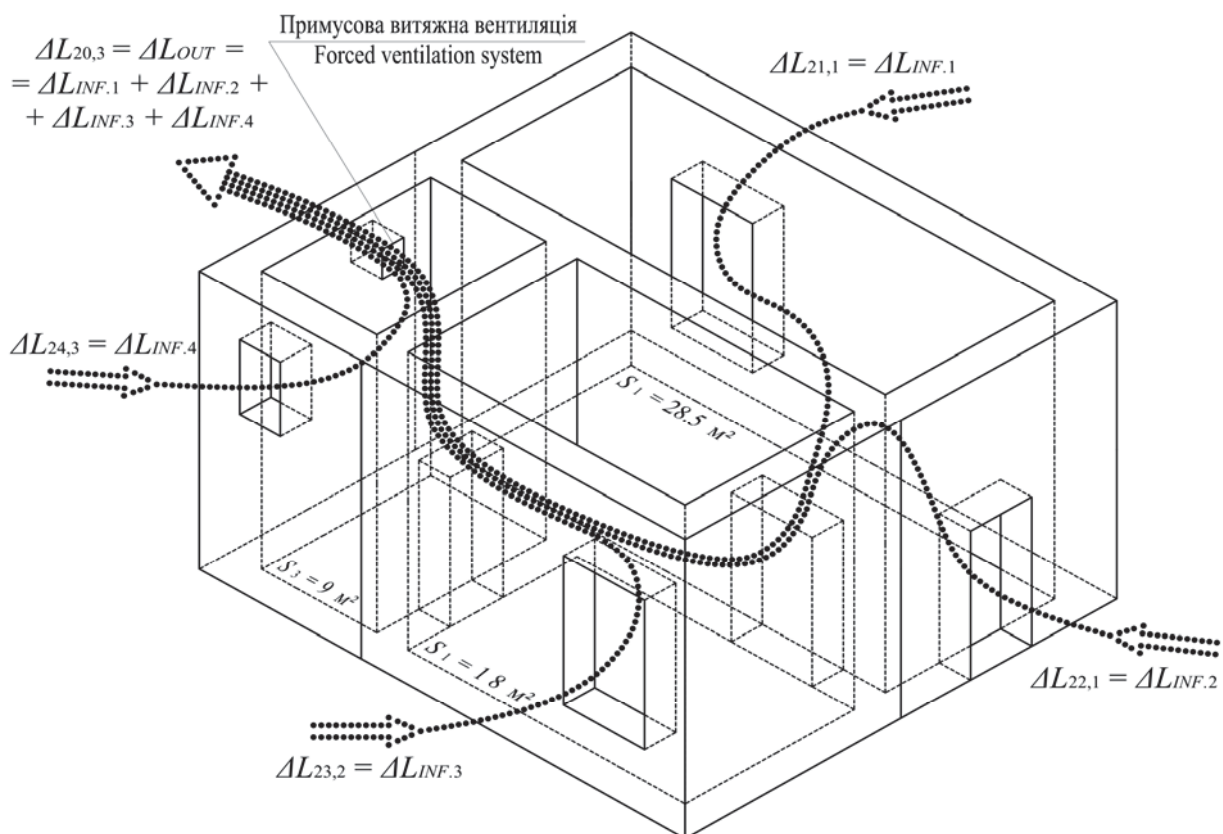


Рис.1. Ізометричне зображення міжкімнатного простору досліджуваного будинку котеджного типу. Умовні позначення: – траєкторії переміщення повітряних мас, що поступають у будинок крізь вікна та зовнішні двері, а видаляються системою примусової вентиляції.

Fig.1. Isometric view of interior space investigated cottage-type home.

Symbols: – trajectory of the movement of air masses entering the house through windows and outside doors, and removed by the forced ventilation system.

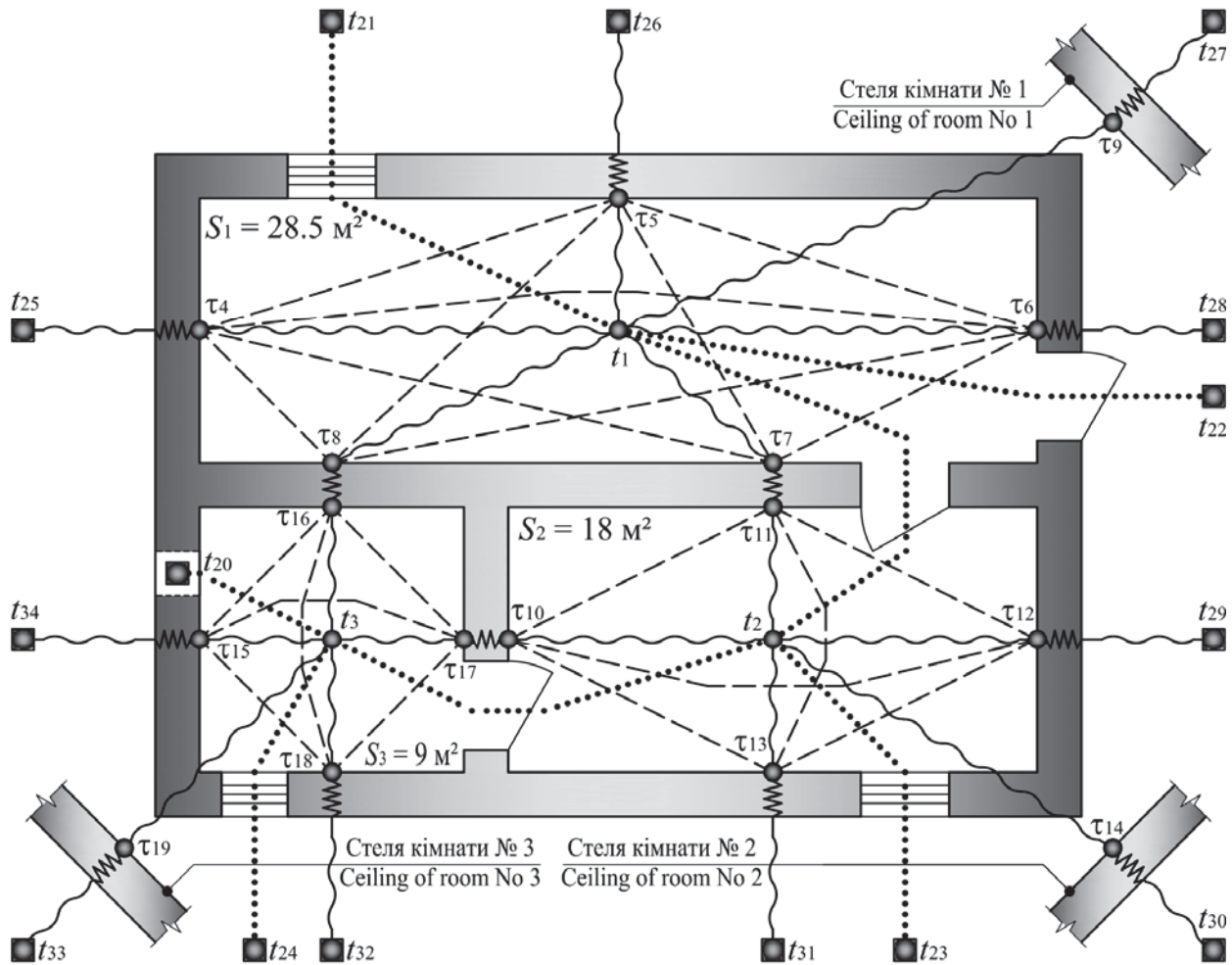


Рис.2. План досліджуваного будинку та дискретна розрахункова модель теплообміну у ньому.

Умовні позначення:

t_i – позначення температури повітря приміщень;

τ_i – позначення температури внутрішніх поверхонь стін;

..... – опори теплопередачі при переміщенні повітряних мас, що поступають у будинок крізь вікна та зовнішні двері, а видаляються системою примусової вентиляції;

~~~~~ – опори трансмісійної теплопередачі крізь внутрішні стіни та зовнішні огорожувальні конструкції;

~~~~~ – опори конвективній теплопередачі;

----- – опори променевої (радіаційної) теплопередачі.

Fig.2. The plan of the researched house and the discrete model of heat transfer in it.

Symbols:

t_i – indoor air temperature designation;

τ_i – designation of the temperature of the internal surfaces of walls;

..... – resistance to heat transfer when moving air masses entering the house through windows and outside doors, and removed by the forced ventilation system;

~~~~~ – resistance to transmission heat transfer through internal walls and external enclosing structures;

~~~~~ – resistance to convective heat transfer;

----- – resistance to radiation heat transfer.

1) до найбільшої кімнати (площею $S_1 = 28.5 \text{ m}^2$) потраплятиме повітря з одного вікна та зовнішніх дверей таким об'ємом:

$$\Delta L_{21,1} = \Delta L_{INF.1} = S_1 \cdot h \cdot n \cdot k_{21}, \quad (9)$$

$$\Delta L_{22,1} = \Delta L_{INF.2} = S_1 \cdot h \cdot n \cdot k_{22}; \quad (10)$$

2) з найбільшої кімнати до середньої (площею $S_2 = 18 \text{ м}^2$) поступатиме повітря в обсязі:

$$L_{4,2} = \Delta L_{21,1} + \Delta L_{22,1} = \Delta L_{INF.1} + \Delta L_{INF.2}; \quad (11)$$

3) об'ємом інфільтраційного повітря, що потраплятиме з одного вікна до середньої кімнати, становитиме:

$$\Delta L_{23,2} = \Delta L_{INF.3} = S_2 \cdot h \cdot n \cdot k_{23}; \quad (12)$$

4) з середньої кімнати до найменшої (площею $S_3 = 9 \text{ м}^2$) повітря поступатиме в такому обсязі:

$$\begin{aligned} L_{2,3} &= \Delta L_{21,1} + \Delta L_{22,1} + \Delta L_{23,2} = \\ &= \Delta L_{INF.1} + \Delta L_{INF.2} + \Delta L_{INF.3}; \end{aligned} \quad (13)$$

5) об'ємом інфільтраційного повітря, що потраплятиме з одного вікна до маленької кімнати, становитиме:

$$\Delta L_{24,3} = \Delta L_{INF.4} = S_3 \cdot h \cdot n \cdot k_{24}; \quad (14)$$

6) і з рештою із маленької кімнати на вулицю видалятиметься наступний обсяг повітряних мас:

$$\begin{aligned} L_{2,3} &= \Delta L_{21,1} + \Delta L_{22,1} + \Delta L_{23,2} + \Delta L_{24,3} = \\ &= \Delta L_{INF.1} + \Delta L_{INF.2} + \Delta L_{INF.3} + \Delta L_{INF.4}. \end{aligned} \quad (15)$$

Наприклад, у формулах (9) – (15) пропонується приймати такі значення коефіцієнтів розподілу надходження повітря з вікон та дверей: $k_{21} = 2/3$, $k_{22} = 1/3$, $k_{23} = k_{24} = 1$.

Слід звернути увагу, що у розрахунковій моделі для її спрощення й наочності відсутні опори радіаційній теплопередачі між поверхнями стін та стелі, однак, для максимальної точності числення при реальному проектуванні варто враховувати усі можливі шляхи теплообміну між заданими точками моделі.

Також, в розрахунковій моделі приймемо умову рівності значень опорів теплопередачі конструкцій покриття та непрозорих

фрагментів стінових огорожувальних конструкцій.

Питомі опори теплопередачі для 1 м^2 непрозорих фрагментів огорожувальних конструкцій з урахуванням теплообміну між зовнішніми поверхнями й повітрям в першому наближенні розраховуватимуться за формулою:

$$R'_{i,j} = \left(\frac{l_M}{\lambda_M} + \frac{l_{INS}}{\lambda_{INS}} + \frac{1}{\alpha_{Kj}} \right) \Big|_{i,j}; \quad (16)$$

тут: l_M та λ_M – товщина шару несучого матеріалу зовнішніх огорожувальних конструкцій та коефіцієнт теплопровідності матеріалу цього шару; l_{INS} та λ_{INS} – товщина шару утеплювача та коефіцієнт теплопровідності цього шару; α_{Kj} – коефіцієнт конвективного теплообміну на зовнішній поверхні огорожувальних конструкцій (у j -й точці розрахункової моделі).

Однак, з урахуванням того, що площа внутрішньої поверхні огорожувальних конструкцій F_i в більшості випадків відрізняється від площі зовнішньої поверхні цих конструкцій F_j , в розрахунковій моделі необхідно ввести додаткові коефіцієнти (понижуючі якщо $F_i < F_j$, й підвищуючі, якщо $F_i > F_j$), які відобразатимуть зменшення або збільшення опору теплопередачі зовнішніх стін та конструкцій (плоских фрагментів) покриття й розраховуватимуться за формулою:

$$\eta_{i,j} = F_i / F_j. \quad (17)$$

Для можливості оцінки величин коефіцієнтів $\eta_{i,j}$ на Рис. 3 продемонстровано площі зовнішніх та внутрішніх поверхонь огорожувальних конструкцій досліджуваного будинку, а також відповідні коефіцієнти.

Відтак, уточнений питомий опір теплопередачі огорожувальних конструкцій, що не містять вікон та дверей має визначатися з урахуванням коефіцієнта (17):

$$R'_{i,j} = \left(\frac{l_M}{\lambda_M} + \frac{l_{INS}}{\lambda_{INS}} + \frac{1}{\alpha_{Kj}} \right) \cdot \eta_{i,j}. \quad (18)$$

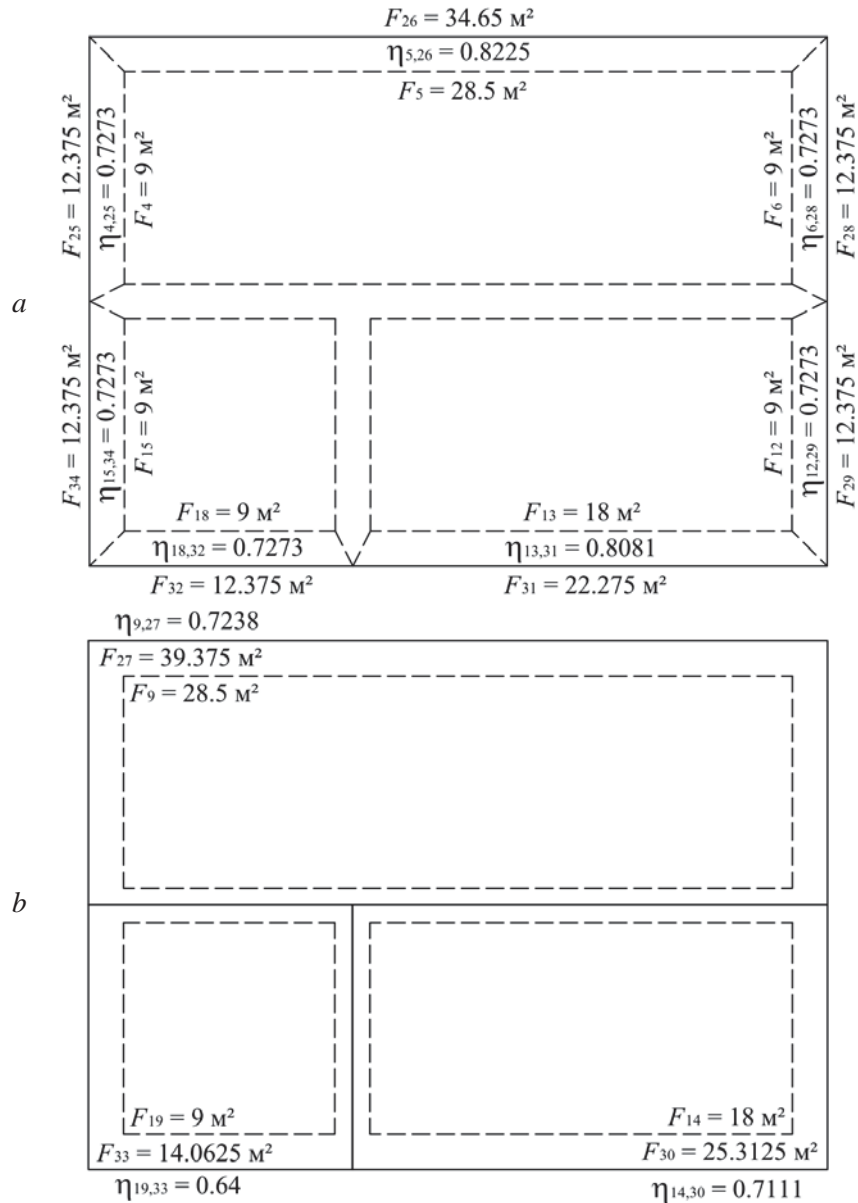


Рис.3. Визначення поправочних коефіцієнтів η_{ij} для зовнішніх огорожувальних конструкцій: *a* – для зовнішніх стін; *b* – для плит покриття.

Умовні позначення:

- – зовнішні поверхні огорожувальних конструкцій;
- – внутрішні поверхні огорожувальних конструкцій.

Fig.3. Determination of correction coefficients η_{ij} for external enclosing structures: *a* – for external walls; *b* – for cover plates.

Symbols:

- – external surfaces of enclosing structures;
- – internal surfaces of enclosing structures.

Отже, коли огорожувальні конструкції не мають віконних прорізів, коефіцієнти теплопередачі цих конструкцій розраховуватимуться за формулою:

$$K'_{i,j} = F_i / R'_{i,j} \quad (19)$$

Якщо ж зовнішня огорожувальна конструкція містить вікна або двері з приведеним опором теплопередачі $R'_{i,j}$, й відповідною площею полотна F'_i , (осклення або дверного полотна), то, з логічних міркувань, опір теплопередачі усієї стіни пови-

нен розраховуватися на основі усереднення опорів теплопередачі фрагментів непрозорих стінових конструкцій (загальною площею полотна F'_i й з питомим опором теплопередачі $R'_{i,j}$, що визначається за формулою (16)) та фрагментів вікон або дверей у відповідності до їх відсоткового вмісту у складі стіни.

Тоді остаточна формула для визначення питомого опору теплопередачі 1 м^2 огорожувальної конструкції матиме наступний вигляд:

$$R_{i,j} = \frac{(R'_{i,j} \cdot F'_i + R''_{i,j} \cdot F''_i)}{F_i} \cdot \eta_{i,j}, \text{ де} \quad (20)$$

$$F_i = F'_i + F''_i. \quad (21)$$

Відтак, для огорожувальної конструкції

$$-(K_{1,4} + K_{1,5} + K_{1,6} + K_{1,7} + K_{1,8} + K_{1,9} + K_{1,21} + K_{1,22} + K_{1,2}) \cdot t_1 + K_{1,4} \cdot \tau_4 + K_{1,5} \cdot \tau_5 + K_{1,6} \cdot \tau_6 + K_{1,7} \cdot \tau_7 + K_{1,8} \cdot \tau_8 + K_{1,9} \cdot \tau_9 + K_{1,21} \cdot t_{21} + K_{1,22} \cdot t_{22} + K_{1,2} \cdot t_2 + Q_1 = 0, \quad (23)$$

$$-(K_{2,10} + K_{2,11} + K_{2,12} + K_{2,13} + K_{2,14} + K_{2,23} + K_{2,1} + K_{2,3}) \cdot t_2 + K_{2,10} \cdot \tau_{10} + K_{2,11} \cdot \tau_{11} + K_{2,12} \cdot \tau_{12} + K_{2,13} \cdot \tau_{13} + K_{2,14} \cdot \tau_{14} + K_{2,23} \cdot t_{23} + K_{2,1} \cdot t_1 + K_{2,3} \cdot t_3 + Q_2 = 0, \quad (24)$$

$$-(K_{3,15} + K_{3,16} + K_{3,17} + K_{3,18} + K_{3,19} + K_{3,24} + K_{3,2} + K_{3,20}) \cdot t_3 + K_{3,15} \cdot \tau_{15} + K_{3,16} \cdot \tau_{16} + K_{3,17} \cdot \tau_{17} + K_{3,18} \cdot \tau_{18} + K_{3,19} \cdot \tau_{19} + K_{3,24} \cdot t_{24} + K_{3,2} \cdot t_2 + K_{3,20} \cdot t_{20} + Q_3 = 0, \quad (25)$$

$$-(K_{4,1} + K_{4,25} + K_{4,5} + K_{4,6} + K_{4,7} + K_{4,8}) \cdot \tau_4 + K_{4,1} \cdot t_1 + K_{4,25} \cdot t_{25} + K_{4,5} \cdot \tau_5 + K_{4,6} \cdot \tau_6 + K_{4,7} \cdot \tau_7 + K_{4,8} \cdot \tau_8 = 0, \quad (26)$$

$$-(K_{5,1} + K_{5,26} + K_{5,4} + K_{5,6} + K_{5,7} + K_{5,8}) \cdot \tau_5 + K_{5,1} \cdot t_1 + K_{5,26} \cdot t_{26} + K_{5,4} \cdot \tau_4 + K_{5,6} \cdot \tau_6 + K_{5,7} \cdot \tau_7 + K_{5,8} \cdot \tau_8 = 0, \quad (27)$$

$$-(K_{6,1} + K_{6,28} + K_{6,4} + K_{6,5} + K_{6,7} + K_{6,8}) \cdot \tau_6 + K_{6,1} \cdot t_1 + K_{6,28} \cdot t_{28} + K_{6,4} \cdot \tau_4 + K_{6,5} \cdot \tau_5 + K_{6,7} \cdot \tau_7 + K_{6,8} \cdot \tau_8 = 0, \quad (28)$$

$$-(K_{7,1} + K_{7,11} + K_{7,4} + K_{7,5} + K_{7,6}) \cdot \tau_7 + K_{7,1} \cdot t_1 + K_{7,11} \cdot \tau_{11} + K_{7,4} \cdot \tau_4 + K_{7,5} \cdot \tau_5 + K_{7,6} \cdot \tau_6 = 0, \quad (29)$$

$$-(K_{8,1} + K_{8,16} + K_{8,4} + K_{8,5} + K_{8,6}) \cdot \tau_8 + K_{8,1} \cdot t_1 + K_{8,16} \cdot \tau_{16} + K_{8,4} \cdot \tau_4 + K_{8,5} \cdot \tau_5 + K_{8,6} \cdot \tau_6 = 0, \quad (30)$$

$$-(K_{9,1} + K_{9,27}) \cdot \tau_9 + K_{9,1} \cdot t_1 + K_{9,27} \cdot t_{27} = 0, \quad (31)$$

$$-(K_{10,2} + K_{10,17} + K_{10,11} + K_{10,12} + K_{10,13}) \cdot \tau_{10} + K_{10,2} \cdot t_2 + K_{10,17} \cdot \tau_{17} + K_{10,11} \cdot \tau_{11} + K_{10,12} \cdot \tau_{12} + K_{10,13} \cdot \tau_{13} = 0, \quad (32)$$

$$-(K_{11,2} + K_{11,7} + K_{11,10} + K_{11,12} + K_{11,13}) \cdot \tau_{11} + K_{11,2} \cdot t_2 + K_{11,7} \cdot \tau_7 + K_{11,10} \cdot \tau_{10} + K_{11,12} \cdot \tau_{12} + K_{11,13} \cdot \tau_{13} = 0, \quad (33)$$

з вікнами та/або дверима коефіцієнти теплопередачі розраховуватимуться так:

$$K_{i,j} = F_i / R_{i,j}. \quad (22)$$

За цією ж формулою слід визначати й коефіцієнти теплопередачі для усіх інших видів опорів передачі теплової енергії при інших видах теплообміну (при конвективному, радіаційному та інфільтраційному переносі), підставляючи площі тих поверхонь F_i , що містять i -ті досліджувані точки розрахункової дискретної моделі.

Маючи усі коефіцієнти теплопередачі для усіх способів теплообміну між розрахунковими точками моделі, можемо скласти рівняння теплового балансу типу (1) для відповідних точок. Після ряду спрощень одержимо наступну систему:

$$-(K_{12,2} + K_{12,29} + K_{12,10} + K_{12,11} + K_{12,13}) \cdot \tau_{12} + K_{12,2} \cdot t_2 + K_{12,29} \cdot t_{29} + K_{12,10} \cdot \tau_{10} + K_{12,11} \cdot \tau_{11} + K_{12,13} \cdot \tau_{13} = 0, \quad (34)$$

$$-(K_{13,2} + K_{13,31} + K_{13,10} + K_{13,11} + K_{13,12}) \cdot \tau_{13} + K_{13,2} \cdot t_2 + K_{13,31} \cdot t_{31} + K_{13,10} \cdot \tau_{10} + K_{13,11} \cdot \tau_{11} + K_{13,12} \cdot \tau_{12} = 0, \quad (35)$$

$$-(K_{14,2} + K_{14,30}) \cdot \tau_{14} + K_{14,2} \cdot t_2 + K_{14,30} \cdot t_{30} = 0, \quad (36)$$

$$-(K_{15,3} + K_{15,34} + K_{15,16} + K_{15,17} + K_{15,18}) \cdot \tau_{15} + K_{15,3} \cdot t_3 + K_{15,34} \cdot t_{34} + K_{15,16} \cdot \tau_{16} + K_{15,17} \cdot \tau_{17} + K_{15,18} \cdot \tau_{18} = 0, \quad (37)$$

$$-(K_{16,3} + K_{16,8} + K_{16,15} + K_{16,17} + K_{16,18}) \cdot \tau_{16} + K_{16,3} \cdot t_3 + K_{16,8} \cdot \tau_8 + K_{16,15} \cdot \tau_{15} + K_{16,17} \cdot \tau_{17} + K_{16,18} \cdot \tau_{18} = 0, \quad (38)$$

$$-(K_{17,3} + K_{17,10} + K_{17,15} + K_{17,16} + K_{17,18}) \cdot \tau_{17} + K_{17,3} \cdot t_3 + K_{17,10} \cdot \tau_{10} + K_{17,15} \cdot \tau_{15} + K_{17,16} \cdot \tau_{16} + K_{17,18} \cdot \tau_{18} + K_{4,8} \cdot \tau_8 = 0, \quad (39)$$

$$-(K_{18,3} + K_{18,32} + K_{18,15} + K_{18,16} + K_{18,17}) \cdot \tau_{18} + K_{18,3} \cdot t_3 + K_{18,32} \cdot t_{32} + K_{18,15} \cdot \tau_{15} + K_{18,16} \cdot \tau_{16} + K_{18,17} \cdot \tau_{17} = 0, \quad (40)$$

$$-(K_{19,3} + K_{19,33}) \cdot \tau_{19} + K_{19,3} \cdot t_3 + K_{19,33} \cdot t_{33} = 0. \quad (41)$$

Підставляючи до системи (23) – (41) величини теплонадходжень у приміщеннях Q_1 , Q_2 і Q_3 , розв'язуємо дану систему відносно невідомих температур. В даному прикладі було прийнято, що уся теплова енергія потрапляє до приміщень безпосередньо через повітря (конвективним шляхом). Відтак інших джерел енергії (окрім вузлів 1, 2 та 3) в моделі немає.

Даний підхід дозволяє експериментальним шляхом, варіюючи обсяги теплонадходжень Q_i , прогнозувати очікувані показники температур в повітрі та на поверхнях стінових конструкцій у приміщеннях досліджуваної будівлі. При цьому основними невідомими величинами являються температури повітря внутрішніх приміщень. Це пряма задача моделювання. Результати розрахунків, виконаних для різних очікуваних температур повітря (для досліджуваного будинку), що видалятиметься витяжною системою, різних температур зовнішнього повітря, а також різних теплонадходжень, представлені в Табл. 1.

Можлива й інша постановка задачі, при якій необхідно визначити такі обсяги теплонадходжень до повітря приміщень, при яких температура цього повітря відповідатиме заданим показникам. Це зворотна задача моделювання, що є найбільш важли-

вою та актуальною. Результати розрахунків, виконаних для різних очікуваних температур повітря (для досліджуваного будинку), що видалятиметься витяжною системою, різних температур зовнішнього повітря, а також різних температур повітря приміщень, представлені в Табл. 2.

В запропонованому прикладі були задані наступні площі полотен світлопрозорих та дверних конструкцій: $F''_5 = 1.5 \text{ м}^2$ (вікно), $F''_6 = 2.0 \text{ м}^2$ (двері), $F''_{13} = 1.5 \text{ м}^2$ (вікно) та $F''_{18} = 0.3 \text{ м}^2$ (вікно). Площами та опорами теплопередачі внутрішніх дверей між кімнатами було знехтувано при визначенні опорів трансмісійної теплопередачі внутрішніх стін для спрощення розрахунків.

Маючи температурні показники на внутрішніх поверхнях стін та у повітрі приміщень можна без ускладнень визначити й оцінити тепловтрати крізь зовнішні огорожувальні конструкції. При цьому, для більш об'єктивної оцінки втрат теплової енергії $G'_{i,j}$ крізь непрозорі стінові утеплені конструкції варто використовувати наступні формули:

$$G'_{i,j} = (F_j - F_i'') \cdot \frac{(t_i - t_j)}{R'_{i,j}}, \text{ де:} \quad (42)$$

Табл. 1. Фізичні параметри моделі і результати розрахунків прямої задачі
Table 1. Physical parameters of the model and results of calculations of the direct problem

| Вид даних | | Номер задачі | | | | | |
|---|--|--|---|--------|--------|--------|--------|
| | | №1 | №2 | №3 | №4 | №5 | |
| Задані величини | Теплові навантаження | Q_1 , Вт | 800 | 900 | 1000 | 1100 | 1200 |
| | | Q_2 , Вт | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 |
| | | Q_3 , Вт | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 |
| | Фізичні характеристики, використані при моделюванні | l_M , м | 0.4 | | | | |
| | | l_{INS} , м | 0.1 | | | | |
| | | λ_M , Вт/(м·К) | 0.08 | | | | |
| | | λ_{INS} , Вт/(м·К) | 0.032 | | | | |
| | | C_0 , Вт/(м ² ·К ⁴) | 5.77 | | | | |
| | | ε , в долях одиниці | 0.5 | | | | |
| | | b , К ³ | 1.01 | | | | |
| | | c , Вт/(кг·К) | 0.281667 | | | | |
| | | ρ , кг/м ³ | 1.2255 | | | | |
| | | α_{Kj} , Вт/(м ² ·К) | Розраховано згідно [4] | | | | |
| | Прийняті питомі опори теплопередачі світлопророзорих та дверних конструкцій | $R'' = R''_{5,26} = R''_{6,28} = R''_{13,31} = R''_{18,32}$, м ² ·К/Вт | Змінні величини.
Визначені згідно [5] (див. графіки на рис. 1.11 – 1.13) | | | | |
| 1.3 | | | | | | | |
| Очікувана температура повітря у витяжній вентиляції | t_{20} , °С | 18 | 20 | 22 | 24 | 26 | |
| Задана температура повітря на вулиці | $t_{EXT} = t_{21} = t_{22} = t_{23} = t_{24} = t_{25} = t_{26} = t_{27} = t_{28} = t_{29} = t_{30} = t_{31} = t_{32} = t_{33} = t_{34}$, °С | 0 | - 5 | - 10 | - 15 | - 20 | |
| Розрахункові величини | Температура повітря у приміщеннях | t_1 , °С | 23.494 | 22.809 | 22.123 | 21.438 | 20.752 |
| | | t_2 , °С | 22.374 | 22.822 | 23.27 | 23.718 | 24.165 |
| | | t_3 , °С | 20.529 | 22.195 | 23.861 | 25.527 | 27.194 |
| | Температура внутрішніх поверхонь стін | τ_4 , °С | 23.052 | 22.289 | 21.526 | 20.762 | 19.999 |
| | | τ_5 , °С | 23.088 | 22.338 | 21.588 | 20.839 | 20.089 |
| | | τ_6 , °С | 22.98 | 22.207 | 21.434 | 20.662 | 19.889 |
| | | τ_7 , °С | 23.2 | 22.515 | 21.831 | 21.146 | 20.461 |
| | | τ_8 , °С | 23.149 | 22.526 | 21.904 | 21.282 | 20.659 |
| | | τ_9 , °С | 23.046 | 22.278 | 21.511 | 20.743 | 19.975 |
| | | τ_{10} , °С | 22.139 | 22.588 | 23.038 | 23.488 | 23.938 |
| | | τ_{11} , °С | 22.208 | 22.576 | 22.944 | 23.312 | 23.68 |
| | | τ_{12} , °С | 21.978 | 22.329 | 22.68 | 23.031 | 23.382 |
| | | τ_{13} , °С | 21.997 | 22.354 | 22.71 | 23.066 | 23.423 |
| | | τ_{14} , °С | 21.94 | 22.282 | 22.624 | 22.966 | 23.308 |
| | | τ_{15} , °С | 20.187 | 21.724 | 23.261 | 24.798 | 26.335 |
| | | τ_{16} , °С | 20.495 | 22 | 23.504 | 25.009 | 26.513 |
| | | τ_{17} , °С | 20.461 | 22.002 | 23.543 | 25.083 | 26.624 |
| | | τ_{18} , °С | 20.179 | 21.713 | 23.247 | 24.781 | 26.316 |
| | | τ_{19} , °С | 20.088 | 21.61 | 23.133 | 24.656 | 26.178 |

Табл. 2. Фізичні параметри моделі і результати розрахунків зворотної задачі
Table 2. Physical parameters of the model and results of calculations of the inverse problem

| Вид даних | | | Номер задачі | | | | |
|---|---|---|------------------------|---------|----------|----------|----------|
| | | | №1 | №2 | №3 | №4 | №5 |
| Задані величини | Температура повітря у приміщеннях | $t_1, ^\circ\text{C}$ | 21 | 22 | 23 | 22 | 25 |
| | | $t_2, ^\circ\text{C}$ | 20 | 21 | 22 | 20 | 25 |
| | | $t_3, ^\circ\text{C}$ | 19 | 20 | 21 | 24 | 25 |
| | Фізичні характеристики, використані при моделюванні | $l_M, \text{м}$ | 0.4 | | | | |
| | | $l_{INS}, \text{м}$ | 0.1 | | | | |
| | | $\lambda_M, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ | 0.08 | | | | |
| | | $\lambda_{INS}, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ | 0.032 | | | | |
| | | $C_0, \text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К}^4)$ | 5.77 | | | | |
| | | ε , в долях одиниці | 0.5 | | | | |
| | | $b, \text{К}^3$ | 1.01 | | | | |
| | | $c, \text{Вт}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ | 0.281667 | | | | |
| | | $\rho, \text{кг}/\text{м}^3$ | 1.2255 | | | | |
| | | $\alpha_{Kj}, \text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ | Розраховано згідно [4] | | | | |
| | φ_{ij} , в долях одиниці | Змінні величини.
Визначені згідно [5] (див. графіки на рис. 1.11 – 1.13) | | | | | |
| Прийняті питомі опори теплопередачі світлопрозорих та дверних конструкцій | $R'' = R''_{5,26} = R''_{6,28} = R''_{13,31} = R''_{18,32}, \text{м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$ | 1.3 | | | | | |
| Очікувана температура повітря у витяжній вентиляції | $t_{20}, ^\circ\text{C}$ | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | |
| Задана температура повітря на вулиці | $t_{EXT} = t_{21} = t_{22} = t_{23} = t_{24} = t_{25} = t_{26} = t_{27} = t_{28} = t_{29} = t_{30} = t_{31} = t_{32} = t_{33} = t_{34}, ^\circ\text{C}$ | 0 | -5 | -10 | -15 | -22 | |
| Розрахункові величини | Теплові навантаження | $Q_1, \text{Вт}$ | 711.983 | 905.616 | 1099.249 | 1234.461 | 1516.794 |
| | | $Q_2, \text{Вт}$ | 424.628 | 549.297 | 673.966 | 538.708 | 976.572 |
| | | $Q_3, \text{Вт}$ | 170.573 | 227.453 | 284.334 | 583.475 | 532.239 |
| | Температура внутрішніх поверхонь стін | $\tau_4, ^\circ\text{C}$ | 20.605 | 21.493 | 22.381 | 21.309 | 24.123 |
| | | $\tau_5, ^\circ\text{C}$ | 20.638 | 21.537 | 22.436 | 21.375 | 24.207 |
| | | $\tau_6, ^\circ\text{C}$ | 20.541 | 21.412 | 22.282 | 21.199 | 23.985 |
| | | $\tau_7, ^\circ\text{C}$ | 20.738 | 21.675 | 22.612 | 21.538 | 24.505 |
| | | $\tau_8, ^\circ\text{C}$ | 20.719 | 21.664 | 22.609 | 21.743 | 24.568 |
| | | $\tau_9, ^\circ\text{C}$ | 20.6 | 21.485 | 22.371 | 21.294 | 24.104 |
| | | $\tau_{10}, ^\circ\text{C}$ | 19.818 | 20.773 | 21.729 | 19.932 | 24.652 |
| | | $\tau_{11}, ^\circ\text{C}$ | 19.857 | 20.806 | 21.754 | 19.81 | 24.595 |
| | | $\tau_{12}, ^\circ\text{C}$ | 19.647 | 20.542 | 21.436 | 19.399 | 24.17 |
| | | $\tau_{13}, ^\circ\text{C}$ | 19.666 | 20.565 | 21.465 | 19.437 | 24.213 |
| | | $\tau_{14}, ^\circ\text{C}$ | 19.612 | 20.495 | 21.379 | 19.321 | 24.088 |
| | | $\tau_{15}, ^\circ\text{C}$ | 18.678 | 19.573 | 20.468 | 23.297 | 24.178 |
| | | $\tau_{16}, ^\circ\text{C}$ | 18.932 | 19.882 | 20.833 | 23.56 | 24.61 |
| | | $\tau_{17}, ^\circ\text{C}$ | 18.902 | 19.852 | 20.803 | 23.499 | 24.613 |
| | | $\tau_{18}, ^\circ\text{C}$ | 18.67 | 19.563 | 20.456 | 23.281 | 24.159 |
| | | $\tau_{19}, ^\circ\text{C}$ | 18.591 | 19.462 | 20.333 | 23.161 | 23.989 |

$$R'_{i,j} = \left(\frac{1}{\alpha_{K_i}} + \frac{l_M}{\lambda_M} + \frac{l_{INS}}{\lambda_{INS}} + \frac{1}{\alpha_{K_j}} \right) \cdot \eta'_{i,j}, \quad (43)$$

$$\eta'_{i,j} = \frac{F_i - F_i''}{F_j - F_i''}. \quad (44)$$

Натомість, для віконних (й інших світлопрозорих) і дверних конструкцій оцінку втрат теплової енергії G''_{ij} доцільно виконувати за наступною формулою:

$$G''_{i,j} = F_i'' \cdot \frac{(t_i - t_j)}{R''_{i,j}}. \quad (45)$$

Використання окремих формул для визначення тепловтрат стінових та світлопрозорих й дверних конструкцій обумовлюється тим, що в дійсності температура поверхні стін та вікон не є однорідною через значну різницю між показниками опорів теплопередачі. В той же час розрахункова модель та система рівнянь (23) – (41) передбачає використання усереднених показників опорів теплопередачі огорожувальних конструкцій, чого достатньо для визначення температур або необхідних теплонадходжень з високою точністю. При цьому, для визначення точних тепловтрат крізь конструкції різної площі та опору теплопередачі не можна користуватися усередненими фізичними і геометричними параметрами. Очевидно, застосування окремих формул (42) й (45) є строго необхідним.

ВИСНОВКИ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Продемонстрований приклад розрахунку температурних показників та визначення необхідних затрат теплової енергії на потреби опалення висвітлює усі практичні аспекти застосування методу теплоелектричної аналогії при побудові моделі процесу теплообміну будинку. Запропонований підхід передбачає побудову дискретної геометричної моделі будинку в наочній формі непланарного графу. При цьому враховуються усі види теплообміну між елемента-

ми внутрішнього простору будинку, його огорожувальними конструкціями і зовнішнім середовищем, що робить процес моделювання значно точнішим за інші наближені й укрупнені методи розрахунків.

Завдяки системності математичного розв'язання при моделюванні процесів теплообміну та наочності даного підходу виникають значні перспективи його застосування з метою аналізу впливу форми та положення огорожувальних конструкцій будівлі, а також її об'ємно-планувальних рішень. Також, підхід дозволяє аналізувати вплив інфільтраційних процесів та характеру локальних елементів осклення на загальні показники споживання теплової енергії.

Слід також додати, що на основі запропонованої моделі може бути спрогнозовано не лише обсяг теплової енергії, необхідної в холодну пору року, але й енерговитрати на потреби охолодження та кондиціонування приміщень в теплу пору року. Відтак, даний підхід може стати дієвим інструментом оптимізації прийнятих архітектурно-конструктивних рішень з метою мінімізації або ефективного перерозподілу енергозабезпечення будівлі в цілому протягом року. Окрім того, одним із найбільш перспективних напрямків подальших досліджень є пошук алгоритмів візуального відображення зв'язків між параметрами варіювання моделі та результуючими обсягами енергоспоживання й енерговтрат різними компонентами будівлі.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Khosla Shristi, Singh S. K.** Energy Efficient Buildings. *International Journal of Civil Engineering Research*. Delhi : Research India publications, 2014. Vol.5 (4), P. 361–366.
2. **Psomas Theofanis.** Overheating assessment of energy renovations. *The REHVA European HVAC Journal Brussels*. Vol. 53. Iss. 1. 2016
3. **Wong H. Y.** Handbook of Essential and Data on Heat Transfer for Engineers. London – New York: Longman Group, 1977. 216 p.
4. **Богославский В. Н.** Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха):

- [Учебник для вузов. Изд. 2 е, перераб. и доп.] М. : Высшая школа, 1982. 415 с.
5. **Болгарова Н. М., Плоский В. О., Скочко В. І.** Практичні аспекти побудови фізичної дискретної моделі теплообміну енергоефективної будівлі. *Технічна естетика і дизайн*. К. : КНУБА, 2018. Вип. 13. С. 9-20.
 6. **Лыков А. В.** Тепломасообмен: (Справочник) Изд. 2-е, перераб. и доп. М. : Энергия, 1978. 480 с.
 7. **Пехович А. И., Жидких В. М.** Расчёты теплового режима твёрдых тел. Ленинград : «Энергия», 1976. 352 с.
 8. **Плоский В. О., Скочко В. І.** Геометричне моделювання деяких процесів тепломасообміну. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*. К. : КНУБА, 2012. Вип. 89. С. 285-295.
 9. **Самарский А. А., Вабищевич П. Н.** Вычислительная теплопередача. М. : Едиториал УРСС, 2003. 784 с.
 10. **Сергейчук О. В.** Геометричне моделювання фізичних процесів при оптимізації форми енергоефективних будинків. Дис...д.техн. наук: 05.01.01. К. : КНУБА, 2008. 425 с.
 11. **Фокин К. Ф.** Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. Изд. 3-е, перераб. и доп. М. : Стройиздат, 1973. 287 с.
 12. **Natephra Worawan, Yabuki Nobuyoshi, Fukuda Tomohiro.** Optimizing the evaluation of building envelope design for thermal performance using a BIM-based overall thermal transfer value calculation. *Building and Environment*. Elsevier, 2018. Vol. 136. P. 128–145. doi: 10.1016/j.buildenv.2018.03.032
 13. **Koester S., Falkenberg M., Logemanna M., Wessling M.** Modeling heat and mass transfer in cross-counterflow enthalpy exchangers. *Journal of Membrane Science*. Elsevier, 2017. Vol.525. P. 68–76. doi: 10.1016/j.memsci.2016.10.030
 14. **Alarcon-Rodriguez Arturo, Ault Graham, Stuart Galloway.** Multi-objective planning of distributed energy resources: A review of the state-of-the-art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier, 2010. Vol. 14, Iss. 5, 2010, P. 1353–1366. doi:10.1016/j.rser.2010.01.006
 15. **Riedera Andreas, Christidisb Andreas, Tsatsaronisb George.** Multi criteria dynamic design optimization of a small scale distributed energy system. *Energy*. Elsevier, 2014. Vol. 74, P. 230–239. doi: 10.1016/j.energy.2014.06.007
 16. **Omun Akomeno, Choudhary Ruchi, Boies Adam.** Distributed energy resource system optimisation using mixed integer linear programming. *Energy Policy*. Elsevier, 2013. Vol.61. P. 249–266.
 17. **Söderman Jarmo, Pettersson Frank.** Structural and operational optimisation of distributed energy systems. *Applied Thermal Engineering*. Elsevier, 2006. Vol.26, Iss.13, 2006, P. 1400–1408. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2005.05.034
 18. **Morvajab Boran, Evinsab Ralph, Carmelietab Jan.** Optimising urban energy systems: Simultaneous system sizing, operation and district heating network layout. *Energy*. Elsevier, 2016. Vol.116, Part 1, P. 619–636. doi: 10.1016/j.energy.2016.09.139
 19. **Yang Y, Zhang S, Xiao Y.** Optimal design of distributed energy resource systems coupled with energy distribution networks. *Energy*. 2015. doi: 10.2298/TSCI170718199Y
 20. **Szokolay S. V.** Introduction to Architectural Science: The Basis of Sustainable Design. Oxford : Architectural Press, 2004. doi: 10.1007/978-3-642-00716-3.

REFERENCES

1. **Khosla Shristi, Singh S. K. (2014).** Energy Efficient Buildings. *International Journal of Civil Engineering Research*. Delhi : Research India publications, 5(4), 361–366.
2. **Psomas Theofanis (2016).** Overheating assessment of energy renovations. *The REHVA European HVAC Journal Brussels*. 53(1).
3. **Wong H. Y. (1977).** Handbook of Essential and Data on Heat Transfer for Engineers. London – New York: Longman Group, 216.
4. **Bogoslavskij V. N. (1982).** Stroitel'naja teplofizika (teplofizicheskie osnovy otopenija, ventiljacii i kondicioniro-vanija vozduha) [Construction thermophysics (thermophysical basis of heating, ventilation and air conditioning)]. Moskva : Vysshaja shkola, 415 (in Russian).
5. **Bolharova N. M., Ploskyi V. O., Skochko V. I. (2018).** Praktychni aspekty pobudovy fizychnoi dyskretnoi modeli teploobminu enerhoefektyvnoi budivli [Practical Aspects of Constructing a Physical Discrete Heat Exchange Model of an Energy Efficient Building]. *Tekhnichna estetika i dizain*. Kyiv : KNUBA, 13, 9-20 (in Ukrainian).
6. **Lykov A. V. (1978).** Teplomasoobmen. Moskva : Jenergija, 480 (in Russian).

7. **Pehovich A. I., Zhidkih V. M. (1976).** Raschjoty teplovogo rezhima tvjordyh tel [Calculations of the thermal regime of solids]. Leningrad: «Jenergija», 352 (in Russian).
8. **Ploskyi V. O., Skochko V. I. (2012).** Heometrychne modeliuvannia deiakykh protsesiv teplo masoobminu [Geometrical modeling of some processes of heat and mass transfer]. *Prykladna heometriia ta inzhenerna hrafika*. Kyiv : KNU-BA, 89. 285-295 (in Ukrainian).
9. **Samarskij A. A., Vabishhevich P. N. (2003).** Vychislitel'naja teploperedacha [Computational heat transfer]. Moskva : Editorial URSS, 784 (in Russian).
10. **Serheichuk O. V. (2008).** Heometrychne modeliuvannia fizychnykh protsesiv pry optymizatsii formy enerhoefektyvnykh budynkiv [Geometrical modeling of physical processes in optimizing the form of energy-efficient houses]. Dys. doktora tekhn. nauk: 05.01.01. Kyiv : KNUBA, 425 (in Ukrainian).
11. **Fokin K. F. (1973).** Stroitel'naja teplotehnika ograzhdajushhij chastej zdaniy [Building heat engineering of enclosing parts of buildings]. Moskva : Strojizdat, 287 (in Russian).
12. **Natephra Worawan, Yabuki Nobuyoshi, Fukuda Tomohiro (2018).** Optimizing the evaluation of building envelope design for thermal performance using a BIM-based overall thermal transfer value calculation. *Building and Environment*. Elsevier, 136, 128–145. doi: 10.1016/j.buildenv.2018.03.032
13. **Koester S., Falkenberga M., Logemanna M., Wesslingab M. (2017).** Modeling heat and mass transfer in cross-counterflow enthalpy exchangers. *Journal of Membrane Science*. Elsevier, 525, 68–76. doi: 10.1016/j.memsci.2016.10.030
14. **Alarcon-Rodriguez Arturo, Ault Graham, Stuart Galloway (2010).** Multi-objective planning of distributed energy resources: A review of the state-of-the-art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(5), 1353–1366. doi:10.1016/j.rser.2010.01.006
15. **Riedera Andreas, Christidisb Andreas, Tsatsaronisb George (2014).** Multi criteria dynamic design optimization of a small scale distributed energy system. *Energy*, 74, 230–239. doi: 10.1016/j.energy.2014.06.007
16. **Omun Akomono, Choudhary Ruchi, Boies Adam (2013).** Distributed energy resource system optimisation using mixed integer linear programming. *Energy Policy*, 61, 249–266.
17. **Söderman Jarmo, Pettersson Frank (2006).** Structural and operational optimisation of distributed energy systems. *Applied Thermal Engineering*, 26(13), 1400–1408. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2005.05.034
18. **Morvajab Boran, Evinsab Ralph, Carmelietab Jan (2016).** Optimising urban energy systems: Simultaneous system sizing, operation and district heating network layout. *Energy*. 116(1), 619–636. doi: 10.1016/j.energy.2016.09.139
19. **Yang Y, Zhang S, Xiao Y. (2015).** Optimal design of distributed energy resource systems coupled with energy distribution networks. *Energy*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2015.03.101>. doi: 10.2298/TSCI170718199Y
20. **Szokolay S. V. (2004).** Introduction to Architectural Science: The Basis of Sustainable Design. Oxford : Architectural Press, doi: 10.1007/978-3-642-00716-3.

Modeling of heat transfer in energy efficient building

*Natalja Bolgarova,
Vitalii Ploskyi,
Volodymyr Skochko*

Summary. In the process of designing energy-efficient buildings, special attention needs to be paid to the study of the balance of supply and energy losses. This is explained by the fact that the need to provide the house with energy resources can become a key issue in determining its total area of premises and influence the resulting space-planning decisions. In addition, it is extremely important to be able to accurately estimate the energy costs that will take place in the enclosing structure and the engineering systems of the future house, with a view to minimizing them even at the stage of the design work. To solve this problem, it is necessary to have a flexible and visual apparatus for modeling heat exchange processes and a corresponding mathematical tool base that will allow to take into account the influence of operating modes of all engineering systems (including heating, ventilation and air conditioning systems) at different times of the year, and also to make it possible to easily change the initial and boundary conditions for calculations, namely: changes in external and internal walls, ceilings and coatings, the number and location of translucent structures, and also possible defect and leakiness of the enclosing

structures, as a result of which infiltration processes may occur which will affect the multiplicity of air exchange of rooms and heat loss of the building as a whole. In this paper, we consider a mathematical apparatus for modeling the stationary temperature regime of a building based on a complex system calculation of temperatures on surfaces and in indoor air, taking into account the thermophysical parameters of materials of wall structures, windows and doors, heat inputs from the heating system and other energy sources, and parameters operation of the ventilation system.

An example of the construction of a heat balance system for an energy efficient residential cottage type apartment is demonstrated. The principles of accounting for all types of heat exchange between the surfaces and the air environment of the rooms are shown, as well as the predicted decreases in resistance to the heat transfer of the enclosing structures associated with the shape of the building.

Key words. Energy efficiency, system calculations, heat balance, enclosing structures.