

УДК 697.133 + 699.86

Особливості аналітичного розрахунку параметрів теплопередачі через багат шарову огорожувальну конструкцію в нестационарному режимі

О. М. Недбайло¹, І. К. Божко², В. О. Мартенюк³

¹д.т.н., с.н.с., старший науковий співробітник, Інститут технічної теплофізики, м. Київ, Україна, nan_sashulya@ukr.net, професор, Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна, ORCID: 0000-0003-1416-9651

²к.т.н., старший науковий співробітник, Інститут технічної теплофізики, м. Київ, Україна, bozhkoik@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7458-0835

³аспірант, Національний університет харчових технологій, м. Київ, Україна, vova.marteniuk.95@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9922-9221

Запропонована система алгебраїчних рівнянь для розрахунку параметрів нестационарного складного теплообміну між приміщенням будівлі та довкіллям (з урахуванням теплового впливу інсоляції на поверхню огорожувальної конструкції), що дозволяє вирішити наступні завдання: розрахувати поле температур в складних, в конструктивному відношенні, багат шарових конструкціях, наприклад, коли розташування шарів дискретне; при вимірюванні температури в характерних точках (на стиках шарів і поверхнях конструкції), модель дозволяє визначити теплофізичні характеристики матеріалів, з шарів яких складається конструкція; при проведенні лабораторних випробувань дозволяє істотно скоротити їх довготривалість; при розв'язанні оберненої задачі безпосередньо визначити опір теплопередачі всієї багат шарової конструкції та окремих її шарів.

Ключові слова: багат шарова огорожувальна конструкція, нестационарний теплообмін, теплопередача, температурне поле.

Вступ. Різноманітність методик розрахунку теплотехнічних параметрів теплового режиму приміщень з великою кількістю емпіричних коефіцієнтів є наслідком складності вирішення даної задачі в аналітичному вигляді. Це пояснюється нестационарністю двохвимірною температурного поля в огорожувальних конструкціях (ОК) будівлі, квазістационарністю процесів термостатування приміщень, неізотермічності поверхні низькотемпературних опалювальних систем, а також впливом великої кількості фізичних факторів на результати розрахунку окремих значень. Розбіжність в результатах, що отримані за проаналізованими існуючими підходами в розрахунках досягає майже 40%. Також, окремим чином, слід відмітити відсутність прямого врахування цілорічної теплової дії інсоляції на огорожувальні конструкції.

Актуальність роботи. Науковий інтерес представляє спільне завдання розрахунку параметрів нестационарного теплообміну через багат шарову огорожувальну конструкцію, а також створення його математичної моделі, що дозволила б відзначити особливості ряду питань проектування таких конструкцій, таких як відповідність до регламентованої методики реальних умов експлуатації; зміну значень температури в конструкції при різних режимах експлуатації; розподіл температурного поля в складному конструктивному виконанні

огорожувальної конструкції.

Останні дослідження та публікації. В реальних умовах температура опалювальних приладів часто змінюється через різного роду об'єктивні та суб'єктивні фактори: аварійні ситуації, планові та позапланові зниження і підвищення температури теплоносія і т.і., а температура зовнішнього повітря майже ніколи не залишається постійною навіть протягом доби, таким чином, нестационарний теплообмін присутній практично завжди. Постійна зміна граничних умов обумовлює перманентний процес перерозподілу значень температури в товщі огорожувальної конструкції [1]. Розрізняють два варіанти умов нагрівання або охолодження: зміна температури і зміна теплового потоку на поверхні конструкції [2]. В реальних умовах теплопередачі через захисну конструкцію, змінюється температура поверхні, а тепловий потік, що надходить на поверхню стіни, змінюється в разі ступеневої зміни тепловіддачі нагрівальних приладів системи опалення [3, 4].

Формулювання цілей статті. Запропонована методика розрахунку теплотехнічних параметрів огорожувальної конструкції, що передбачає стаціонарний лінійний розподіл температури в кожному з шарів стіни, так як вважається, що приміщення опалюється регулярно, а температури холодного періоду року досить стабільні.

Основна частина. Розглядається тришарова панель (рис. 1). На ліву (внутрішню) площину I шару 1 подається тепловий потік q . Права площина IV шару 3 (зовнішня) умовно межує з довкіллям. Завдання полягає у визначенні зміни температури $T(x, \tau)$ і теплового потоку $q(x, \tau)$ в часі τ і в просторі по товщині огорожі x . Точність інженерного розрахунку для будівельних конструкцій залежить від правильності обраних значень їх теплофізичних характеристик. При розрахунках зазвичай використовують два основні показники – коефіцієнти: теплопровідності λ і об'ємної теплоємності $c\rho$. Для лінійного рівняння теплопровідності при λ і $c\rho = \text{const}$ вводять коефіцієнт температуропровідності $a = \lambda / c\rho$.

Для розв'язання такої задачі необхідно, щоб були задані:

- початкові умови, що визначають розподіл температури по товщині і на границях ОК в початковий момент часу;
- рівняння енергії, що описує процес теплопровідності через товщину конструкції;
- граничні умови, що визначають умови теплообміну на всіх характерних площинах.

Початкові умови можуть бути задані у вигляді рівняння, таблиці, графіка розподілу температури в момент початку процесу (при $\tau=0$). У загальному випадку рівняння початкових умов має вигляд $T=T(x, 0)$, а рівняння теплопровідності

$$\frac{\partial(c\rho T)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right] \quad (1)$$

Для нашого випадку зручно записати систему лінійних диференціальних рівнянь із постійними коефіцієнтами. Кожне рівняння записуємо для окремого i -го шару з додатковими граничними умовами на стиках шарів, вважаючи, що в межах кожного окремого шару λ_i і $c_i\rho_i = \text{const}$ (i - номер шару)

$$\left. \begin{aligned} \text{шар 1: } c_1\rho_1 \frac{\partial T_1}{\partial \tau} &= \lambda_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} \\ \text{шар 2: } c_2\rho_2 \frac{\partial T_2}{\partial \tau} &= \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} \\ \text{шар 3: } c_3\rho_3 \frac{\partial T_3}{\partial \tau} &= \lambda_3 \frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

В площині II (між 1 і 2 шарами), виходячи з рівності значень теплових потоків і температур, задаються умови четвертого роду

$$\left. \begin{aligned} \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{\text{II}} &= \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{\text{II}} \text{ або } q_1 = q_2 \\ T_1 \Big|_{\text{II}} &= T_2 \Big|_{\text{II}} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

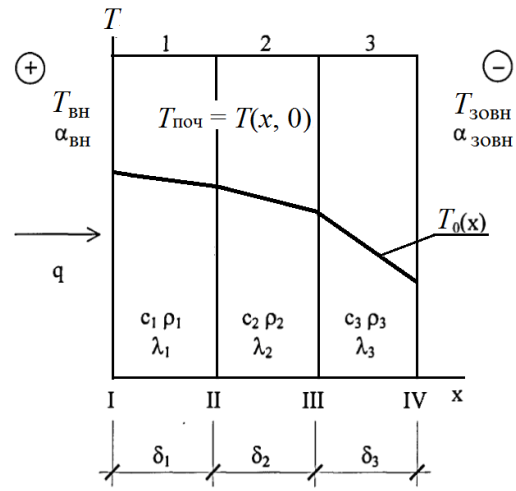


Рис. 1. Фізична постановка задачі

Аналогічно записуються граничні умови в площині III

$$\left. \begin{aligned} \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{\text{III}} &= \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} \Big|_{\text{III}} \text{ або } q_2 = q_3 \\ T_2 \Big|_{\text{III}} &= T_3 \Big|_{\text{III}} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Граничні умови теплообміну на площинах I і IV, тобто на внутрішній і зовнішній поверхнях ОК, що контактують, відповідно, з внутрішнім і зовнішнім повітрям, а також оточені іншими поверхнями: внутрішнє повітря з температурою $T_{\text{вн}}$, зовнішнє з температурою $T_{\text{зовн}}$. Внутрішня поверхня огорожувальної конструкції має температуру $T_{\text{р}}$. Якщо враховувати конвективний і радіаційний види теплообміну, то в розрахунок вводяться, відповідно, коефіцієнти $\alpha_{\text{конв}}$ і $\alpha_{\text{рад}}$. При наявності джерела теплоти, його радіаційна складова, що поглинається площиною I, визначається виразом

$$q_{\text{рад}} = \varepsilon q \quad (5)$$

де ε – коефіцієнт поглинання поверхні ОК для теплового випромінювання,

q – інтенсивність випромінювання, що припадає на ОК від джерела (довідкові дані, інтенсивність інсоляції для даної місцевості за метеоспостереженнями), Вт/м².

Якщо розглядати загальний випадок, то на поверхні огорожень відбувається складний теплообмін, що визначається граничними умовами другого роду (задана інтенсивність теплового потоку) і третього роду (задані умови теплообміну з атмосферним повітрям). З огляду на це, граничні умови на площині I мають вигляд

$$\alpha_{\text{вн, конв}}(T_{\text{вн}} - T_{1|I}) + \alpha_{\text{вн, рад}}(T_{\text{R вн}} - T_{1|I}) = -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_I \quad (6)$$

Граничні умови на площині IV записуються як

$$\alpha_{\text{зовн, конв}}(T_3|_{IV} - T_{\text{зовн}}) + \alpha_{\text{зовн, рад}}(T_3|_{IV} - T_{\text{R зовн}}) + \varepsilon_{\text{зовн}} q_{\text{зовн}} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} \Big|_{IV} \quad (7)$$

Для приміщень умови радіаційно-конвективного теплообміну в практиці будівельного проектування враховуються єдиним коефіцієнтом теплообміну $\alpha_{\text{вн}}$, тоді умова (6) набуде вигляду

$$\alpha_{\text{вн}}(T_{\text{н}} - T_{1|I}) = -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_I \quad (8)$$

Для холодного періоду року в натурних дослідженнях, а також в лабораторних умовах при відсутності в приміщенні джерел теплоти (відсутність опалення в теплий період року), можна ввести аналогічне спрощення також і для зовнішньої поверхні досліджуваного об'єкту. Тоді (2.7) набуде вигляду

$$\alpha_{\text{зовн}}(T_3|_{IV} - T_{\text{зовн}}) = -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} \Big|_{IV} \quad (9)$$

Цілорічно при натурних дослідженнях необхідно враховувати величину інсоляції, а при лабораторних, в холодний період – величину випромінювання опалювальних приладів.

Наступний вираз представляє змішані граничні умови другого і третього родів, що можна перетворити, використовуючи умовну температуру зовнішнього середовища $T_y = T_{\text{зовн}} + \varepsilon_{\text{зовн}} q_{\text{зовн}} / \alpha_{\text{зовн}}$, у вигляді

$$\alpha_{\text{зовн}}(T_y - T_3|_{IV}) = -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} \Big|_{IV} \quad (10)$$

Розв'язання поставленого завдання викликає математичні складності, оскільки система рівнянь є нелінійною. Тому пропонується використання комбінованого методу дослідження крайових задач теплопереносу, що базується на основі поєднання елементів аналітичного і чисельного розв'язків. Суть методу полягає в тому, що весь процес теплопереносу розглядається на ряді малих часових інтервалів. У кожному проміжку часу допускається, що значення температури постійні в площинах II і III, а також

постійна густина теплового потоку через дотичні поверхні, тобто є ідеальний тепловий контакт.

Загальне завдання розбивається на три автономні, але взаємопов'язані між собою складові:

1. Теплоперенос в шарі 1 з граничними умовами третього роду, що враховують конвективний теплообмін на площині I, і першого роду, що характеризують сталість температури в площині II між шарами 1 і 2.

2. Теплоперенос в шарі 2 з граничними умовами другого роду, що характеризують сталість густини теплового потоку через площину II, і першого роду, що характеризують сталість температури в площині III.

3. Теплоперенос в шарі 3 з граничними умовами другого роду в площині III і граничними умовами третього роду, що характеризують теплообмін між поверхнею шару 3 на площині IV з навколишнім середовищем за законом Ньютона - Рихмана.

Кожне з цих завдань розв'язується аналітично. Розв'язок загальної задачі нестационарної теплопровідності можна отримати в результаті сполучення аналітичних розв'язків на кожному часовому інтервалі. Це дозволяє перейти від граничних умов четвертого роду до граничних умов першого і другого родів на поверхнях поділу шарів 1 і 2, 2 і 3, що взагалі полегшує розв'язання завдання.

Наведений алгоритм, що розроблений для тришарової конструкції [5]. У завданнях 1 і 3 розглянуті крайні (зовнішні) шари, в завданню 2 – середній шар. Не складає особливих труднощів поширити цей алгоритм на n-шарову конструкцію, тому що крайніми в n-шаровій конструкції будуть шари, що описані в задачах 1 і 3, а кожен проміжний (середній) шар описується завданням 2.

Висновки. Рівень сучасної комп'ютерної техніки та спеціального програмного забезпечення дозволяє швидко і точно вирішувати завдання теплопередачі через ОК, базуючись на всій сукупності кліматичних факторів, без введення будь-яких припущень і спрощень. Зокрема, досить точно врахувати вплив інсоляції завдяки інформації, що міститься в метеорологічних довідниках.

Розроблена математична модель дозволяє розв'язати наступні завдання:

- оцінити теплофізичний стан конструкцій, що проектуються для різних режимів експлуатації і, як наслідок, раціонально їх спроектувати

під конкретний режим або їх діапазон;
- розрахувати поле температур в складних, в конструктивному відношенні, багат шарових конструкціях, наприклад, коли розташування шарів дискретне.

Перспективи подальших досліджень. На основі розробленої математичної моделі розглядається можливість розрахунку та оптимізації основних теплотехнічних параметрів багат шарових огорожувальних конструкцій тощо.

Література

1. Фиалко Н.М., Черных Л.Ф. Тепловое состояние трехслойных наружных стен помещения при напольном электротеплоаккумуляционном отоплении. Промышленная теплотехника. 2004. Т. 26. № 5. С. 48 – 56.
2. Круковский П.Г., Пархоменко Г.А., Тадля О.Ю., Метель М.А. Идентификация параметров теплопотерь помещения по бесконтактным измерениям температур. Промышленная теплотехника. 2009. Т. 31. №3. С. 46 – 55.
3. Басок Б.И., Накорчевский А.И. Моделирование теплопередачи через наружное ограждение зданий с учетом непрерывного действия климатических факторов. Строительные конструкции. Межведомственный научно-технический сборник. 2014. Выпуск 80. С. 113 – 120.
4. Маляренко В.А., Редько А.Ф., Чайка Ю.И., Поволочко В.Б. Строительная теплофизика ограждающих конструкций зданий и сооружений. Харьков: Рубикон. 2001. 280 с.
5. Недбайло А.Н. Особенности теплопередачи через многослойную ограждающую конструкцию в нестационарном режиме. Керамика: наука и жизнь. №1(22). 2014. С. 4 – 9.

References

1. Fialko N.M., Chernyih L.F. Teplovoe sostoyanie trehsloynnyih naruzhnyih sten pomesheniya pri napolnom elektroteploakkumulyatsionnom otoplenii. Promyishlennaya teplotekhnika. 2004. T. 26. №5. P. 48 – 56.
2. Krukovskiy P.G., Parhomenko G.A., Tadya O.Yu., Metel M.A. Identifikatsiya parametrov teplopoter pomesheniya po beskontaktnyim izmereniyam temperatur. Promyishlennaya teplotekhnika. 2009. T. 31. №3. P. 46 – 55.
3. Basok B.I., Nakorchevskiy A.I. Modelirovanie teploperedachi cherez naruzhnoe ograzhdenie zdaniy s uchetom nepreryivnogo deystviya klimaticheskikh faktorov. Stroitelnyie konstruksii. Mezhvedomstvennyiy nauchno-tehnicheskii sbornik. 2014. Vyipusk 80. P. 113 – 120.
4. Malyarenko V.A., Redko A.F., Chayka Yu.I., Povolochko V.B. Stroitel'naya teplofizika ograzhdayuschih konstruksiy zdaniy i sooruzheniy. Harkov: Rubikon. 2001. 280 p.
5. Nedbailo A.N. Osobennosti teploperedachi cherez mnogoslounuyu ograzhdayuschuyu konstruksiyu v nestatsionarnom rezhime. Keramika: nauka i zhizn. №1(22). 2014. P. 4 – 9.

UDC 697.133 + 699.86

Peculiarities of the analytical calculation of heat transfer parameters through a multi-layer enclosing structure in non-stationary mode

O. Nedbailo¹, I. Bozhko², V. Marteniuk³

¹ Doctor of Technical Sciences, Senior Research Fellow, Senior Scientist, Institute of Engineering Thermophysics, Kyiv, Ukraine, Professor of National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine, nan_sashulya@ukr.net,

ORCID: 0000-0003-1416-9651

² Ph.D., Senior Scientist, Institute of Engineering Thermophysics, Kyiv, Ukraine, bozhkoik@gmail.com,

ORCID: 0000-0001-7458-0835

³ Postgraduate PhD, National University of Food Technology, Kyiv, Ukraine

ORCID: 0000-0001-9922-9221

Abstract. A system of algebraic equations is proposed for calculating the parameters of non-stationary complex heat exchange between the premises of the building and the environment (taking into account the thermal effect of insolation on the surface of the enclosing structure), which allows you to solve the following tasks: calculate the temperature field in complex, structurally, multilayered structures, for example, when the location discrete layers; when measuring the temperature at characteristic points (at the joints of layers and surfaces of the structure), the model allows you to determine the thermophysical characteristics of the materials from which the structure consists of layers; when conducting laboratory tests, it allows to significantly reduce their duration; when solving the inverse problem, directly determine the heat transfer

resistance of the entire multilayer structure and its individual layers. The level of modern computer technology and special software allows you to quickly and accurately solve the problem of heat transfer through the OC, based on the entire set of climatic factors, without introducing any assumptions and simplifications. In particular, it is quite accurate to take into account the influence of insolation thanks to the information contained in meteorological handbooks. The developed mathematical model allows solving the following tasks: to assess the thermophysical condition of structures designed for different modes of operation and, as a result, to rationally design them for a specific mode or their range; calculate the temperature field in structurally complex multi-layer structures, for example, when the arrangement of layers is discrete. On the basis of the developed mathematical model, the possibility of calculating and optimizing the main thermal parameters of multi-layer enclosing structures, etc. is considered.

Keywords: multi-layer enclosure structure, unsteady heat exchange, heat transfer, temperature field..

▪