

СОКОЛ КОСТЯНТИН

Херсонський національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0001-5155-7202>e-mail: kostya13sokol@gmail.com

ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ ЕНЕРГОПОТРЕБ БУДІВЛІ

У роботі продемонстровано створення комп'ютерної системи для розрахунку енергопотреб будівлі на основі розробленого методу, що об'єднує в собі переваги числових та інженерних методів розрахунку теплопередачі.

Ключові слова: теплопередача, комп'ютерна система.

SOKOL KOSTIANTYN

Kherson National Technical University

SOFTWARE IMPLEMENTATION OF THE METHOD OF CALCULATING THE ENERGY CONSUMPTION OF A BUILDING

In the conditions of a constant increase in energy prices, the desire to reduce harmful emissions to the atmosphere, as well as the shortage of fossil fuels that can be used for heating, methods of increasing energy efficiency and energy saving attract attention. One of the main characteristics of a building's energy efficiency is its energy consumption - a value that determines the amount of energy that must be spent on heating or conditioning the interior of the building to ensure a comfortable temperature. This work is devoted to the development of the calculation method and its software implementation. In the course of the study, several of the most common methods of heat transfer analysis were developed, in particular, methods of numerical analysis based on the approximation of differential equations and engineering calculation methods using equations describing various mechanisms of heat transfer. Having determined that none of the methods is optimal for solving the set goal, it was decided to synthesize a new method, using the best approaches from all the processed information. The result was the developed method, the basis of which were the formulas for calculating thermal conductivity, convection, thermal radiation, and heat capacity, which in terms of the structure of its implementation is similar to numerical methods, where the calculation progresses gradually along two coordinates: spatial and temporal, and also, in some formulas, there are weights coefficients similar to those used in the finite element method. The calculation is organized in such a way that a more detailed analysis of the building's thermal behavior is also possible. The availability of such a method, as well as the computer system in which it is implemented, will allow to quickly obtain fairly accurate values of the building's energy needs. The characteristics of the computer system make it convenient for use in the design of private and multi-apartment buildings with clear energy efficiency requirements.

Keywords: heat transfer, computer system.

Постановка проблеми

Енергопотреба будівлі визначає кількість енергії, необхідну для підтримки заданої температури та забезпечення комфортного мікроклімату в приміщенні. Для визначення її величини, необхідно використовувати один з методів розрахунку теплопередачі. Існує два основних типи таких методів: числові та інженерні.

У числових методах, такі як метод кінцевих різниць, метод кінцевих об'ємів та метод кінцевих елементів, загалом, використовується наступний алгоритм вирішення задачі:

1. Область у просторі, для якої проводиться дослідження, розділяється на певну кількість дискретних елементів.

2. Відбувається апроксимація диференціальних рівнянь: для методу кінцевих різниць та кінцевих об'ємів, диференціальні та інтегральні апроксимації відповідно приводять до кінцевого рівняння, у якому присутні лише дискретні значення, пов'язані з положеннями у просторі; для методу кінцевих об'ємів, використовуються функції форми для апроксимації розподілу поліномів на кожному елементі.

3. Після цього, виникає алгебраїчна система рівнянь, вирішення якої веде до отримання числового розв'язку.

Використання даних методів дозволить досить глибоко досліджувати процеси зміни температури, проте, вони є досить ресурсоемними, тобто, дослідження займають дуже багато часу, особливо при дослідженні великих об'єктів, таких як будівлі.

Інженерні методи, на даний момент, є основними для розрахунку енергоспоживання будівель. Здебільшого, вони побудовані на основі рівнянь, що описують різні механізми теплопередачі: теплопровідність, конвекція, випромінювання та теплоємність. Доступна вихідна інформація для таких методів, дає на виході остаточні шукані значення енергоспоживання, як правило, у формі середньомісячних величин. Хоча, розрахунок, у такому разі, займає відносно небагато часу, а також, для цього не потрібно будувати комп'ютерну систему, такі методи не дозволяють зрозуміти процеси теплопередачі, або те, як і чому система опалення поводить себе в певний час, щоб підвищити її ефективність.

Враховуючи усе вищезазначене, було вирішено створити новий метод, що об'єднає переваги числових та інженерних методів, дозволяючи проводити досить швидкі розрахунки достатньої точності, що також дозволить досліджувати теплову поведінку будівлі в конкретні моменти.

Аналіз останніх джерел

Аналізуючи роботи [1-5], де показані основи використання числових методів для вирішення рівняння теплопередачі, а також [6], де описані базові концепції механізмів теплопередачі, зокрема,

концепцію термічного опору, було визначено, що жоден з описаних методів не є таким, що ідеально підходить під задачу розрахунку енергопотреб об'єкту, що має порівняно великі геометричні розміри. Проте, була визначена можливість виділити з даного матеріалу окремі визначення, формули та підходи, що нададуть можливість створити новий, більш зручний, швидкий та точний метод розрахунку енергопотреб будівлі.

Метою роботи є створення комп'ютерної системи для розрахунку енергопотреб будівлі.

Виклад основного матеріалу

У роботі [7] показані структурні схеми огорожувальних конструкцій будівлі з пасивною системою опалення закритого типу. Для реалізації методу розрахунку в статті, зручно буде розглянути аналогічні схеми, але представлені у вигляді мереж, де буде показаний напрямок переносу теплових потоків, виділених з рівнянь, що описують основні механізми теплопередачі. Суть методу полягає у розрахунку температури крок за кроком у просторовій координаті, де один крок відповідає одному шару конструкції, та часовій координаті, де один крок дорівнює одній годині. Температура визначається з рівнянь механізмів теплопередачі, що приймають участь у переносі тепла для певного шару.

Схема теплопередачі для суцільної стіни (рис. 1), показує, що ззовні на стіну впливають конвекція (Q_{conv}) та випромінювання (Q_{rad}), у внутрішніх шарах енергія переноситься за рахунок теплопровідності (Q_{cond}), а теплова інерція конструкції враховується за рахунок теплоємності (Q_{cap}). Від стіни, до внутрішньої термальної маси будівлі, перенос енергії відбувається за рахунок конвекції та випромінювання, і знову, накопичення тепла враховується за рахунок теплоємності. Схема теплопередачі для даху або горища не буде відрізнятися від стіни.

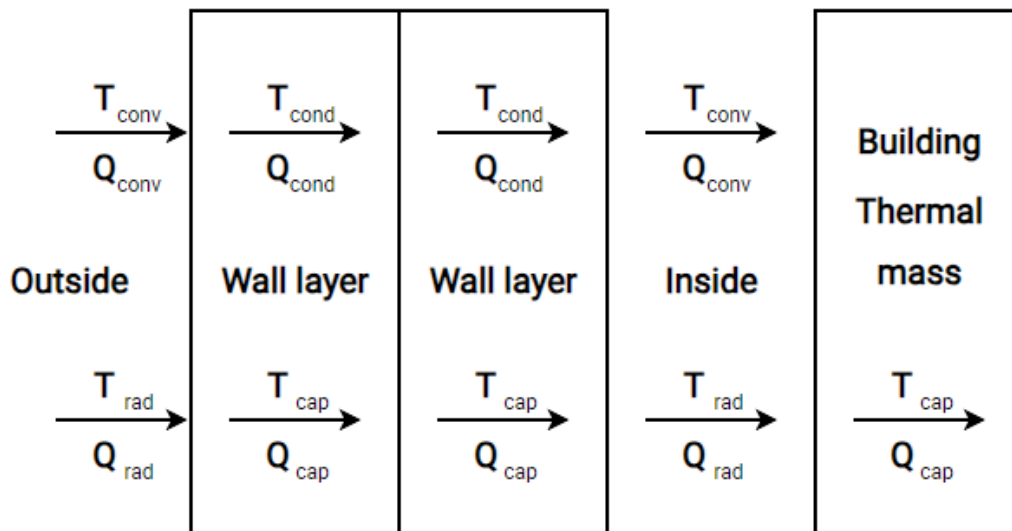


Рис. 1. Схема теплопередачі для суцільної стіни

Схема підлоги (рис. 2) відрізняється тим, що для неї відсутня конвекція та випромінювання ззовні, адже фундамент будівлі, найчастіше, немає контакту з середовищем, де можливе виникнення теплових потоків, а тільки із землею, тому теплопередача до зовнішнього шару підлоги відбувається за рахунок теплопровідності.

Температурні компоненти конвекції та випромінювання приведені в формулах (1) та (2):

$$T_{s,c,n} = T_{out,n} - \frac{Q_{conv,n,out}}{\alpha_{out} \cdot S}, K, \tag{1}$$

де $T_{out,n}$ – випромінювальна температура оточуючого середовища в годину n , K ;

$Q_{conv,n,out}$ – величина конвекції в годину n , Bm ;

α – коефіцієнт теплопередачі конвекцією, $Bm/(m^2 \cdot K)$;

S – площа поверхні теплопередачі, m^2 .

$$T_{rad,n}^4 = \frac{Q_{rad,n}}{\epsilon \cdot \sigma_0 \cdot S} + T_{s,c,n}^4, K, \tag{2}$$

де $T_{rad,n}$ – температура випромінювача у годину n ;

$Q_{rad,n}$ – величина сонячного випромінювання в годину n , Bm ;

σ_0 – стала Стефана-Больцмана, $Bm/(m^2 K^4)$.

Невідомою залишається температура в нульову годину, на якій базуються подальші обчислення, формула для її розрахунку враховує випромінювання від стіни назовні в нічний час:

$$T_{s,c,0} = T_{out,0} \cdot \left(T_{out,0}^4 \cdot (\sigma_0 - \varepsilon\sigma_0) \right)^{\frac{1}{4}}, K, \quad (3)$$

де $T_{out,0}$ – температура оточуючого середовища в нульову годину, K .

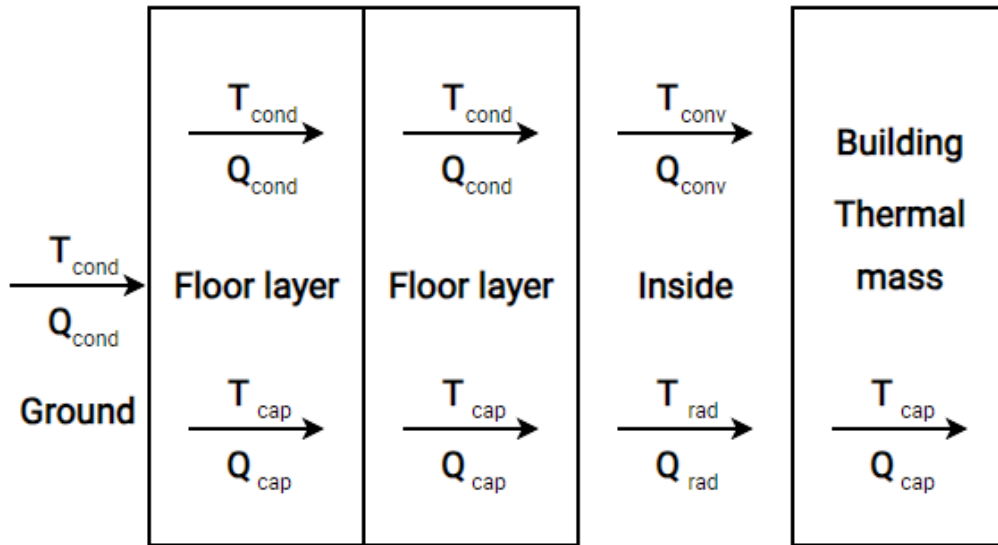


Рис. 2. Схема теплопередачі для підлоги

Для розрахунку температури зовнішнього шару, необхідно скласти вищезазначені температурні компоненти, але, очевидно, що вплив кожної з величин в певний період часу має різний вплив на сумарну величину, тому вирішено використовувати вагові коефіцієнти, подібно, як для методу кінцевих елементів [2], виражені як відношення певної величини до сумарної потужності, що передається шару:

$$T_{n,out} = T_{s,c,n} \left(\frac{|Q_{conv,n-1,out}|}{|Q_{conv,n,out}| + |Q_{rad,n}|} \right) + T_{rad,n} \left(\frac{|Q_{rad,n}|}{|Q_{conv,n,out}| + |Q_{rad,n}|} \right), K, \quad (4)$$

Для розрахунку теплопередачі внутрішніх шарів, необхідно визначити температурні компоненти теплопровідності та теплоємності:

$$T_i = T_{i-1} - \frac{Q_{cond} \delta_i}{\lambda S}, K \quad (5)$$

де T_i – температура i -го шару, K ;

Q_{cond} – величина теплопровідності в годину n , Bm ;

δ_i – товщина шару, m .

$$T_i = T_{i-1} - \frac{Q_{cap}}{cm} \quad (6)$$

де c – коефіцієнт теплоємності матеріалу, $Dж/(кгK)$;

m – маса, $кг$.

Також, при розрахунку внутрішніх шарів, введено коефіцієнт зміни температури у просторовій координаті, запозичений з методу кінцевих різниць [1]:

$$T_{c,i} = \frac{\frac{\lambda_i}{c_i \rho_i}}{2 \left(\frac{\lambda_i}{c_i \rho_i} + 1 \right)} \quad (7)$$

де ρ_i – густина матеріалу, з якого виконано шар, $кг/м^3$.

Урешті, температура внутрішніх шарів розраховується за формулою:

$$T_i = \left(T_{n-1,i-1} - \frac{Q_{cond,n-1,i} \cdot \delta_i}{\lambda_i S} \right) \left(\frac{|Q_{cond,n-1,i}|}{2|Q_{cond,n-1,i}| + 2|Q_{cap,n-1,i}|} \right) + \left(T_{n,i-1} - \frac{Q_{cap,n-1,i}}{c_i m_i} \right) \left(\frac{|Q_{cap,n-1,i}|}{2|Q_{cond,n-1,i}| + 2|Q_{cap,n-1,i}|} \right) + (T_{n,i-1} - T_{c,i}) \left(\frac{|Q_{cond,n-1,i}|}{2|Q_{cond,n-1,i}| + 2|Q_{cap,n-1,i}|} \right) + (T_{n-1,i} - T_{c,n}) \left(\frac{|Q_{cap,n-1,i}|}{2|Q_{cond,n-1,i}| + 2|Q_{cap,n-1,i}|} \right), K \quad (8)$$

Температура термальної маси будівлі, яку складають внутрішні стіни та об'єм повітря, розраховується окремо для кожної огорожувальної конструкції:

$$T_{n,in} = \left(T_{n,in-1} - \frac{Q_{conv,n-1,in}}{\alpha_{in} \cdot S} \right) \left(\frac{|Q_{conv,n-1,in}|}{|Q_{conv,n-1,in}| + |Q_{cap,n-1,in}| + |Q_{rad,n-1,in}|} \right) + \left(T_{n,in-1} - \frac{Q_{cap,n-1,in}}{c_{in} m_{in}} \right) \left(\frac{|Q_{cap,n-1,in}|}{|Q_{conv,n-1,in}| + |Q_{cap,n-1,in}| + |Q_{rad,n-1,in}|} \right) + \left(T_{n,in-1}^4 - \frac{Q_{rad,n-1,in}}{\varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot S} \right)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{|Q_{rad,n-1,in}|}{|Q_{conv,n-1,in}| + |Q_{cap,n-1,in}| + |Q_{rad,n-1,in}|} \right), K \tag{9}$$

Для схеми теплопередачі вікон (рис. 3) враховується особливість даної конструкції – її прозорість для випромінювальної енергії, що генерує Сонце, це показано стрілкою прямо до внутрішньої термальної маси будівлі крізь скло. Це відображається в формулі (10):

Реалізація методу відбувається за допомогою мови програмування Python. Вхідні дані, такі як, значення температури навколишнього середовища або потужності сонячного випромінювання, розраховуються заздалегідь у Excel і можуть використовуватися за допомогою пакету «pandas». Приклад програмної реалізації розрахунку теплопередачі суцільної стіни наведений на рис. 4. У даному випадку конструкція поділена на п'ять шарів, але, так як всі внутрішні шари розраховуються однаково, продемонстровано лише один із них.

На рис. 5 показана програмна реалізація розрахунку теплопередачі вікон. Тут, конструкція «if-else» використовується для контролю наявності, власне, вікон, на обраній стороні будівлі.

$$T_{n,in,w} = T_{n,in} \left(\frac{|Q_{conv,n,in}| + |Q_{cap,n,in}| + |Q_{rad,n,in}|}{|Q_{conv,n,in}| + |Q_{cap,n,in}| + |Q_{rad,n,in}| + |Q_{rad,n}|} \right) + T_{rad,n} \left(\frac{|Q_{rad,n}|}{|Q_{conv,n,in}| + |Q_{cap,n,in}| + |Q_{rad,n,in}| + |Q_{rad,n}|} \right), K \tag{10}$$

Після розрахунку термальної маси будівлі для кожної окремої огорожувальної конструкції, необхідно розрахувати загальну внутрішню температуру. Знову ж таки, зрозуміло, що кожна така конструкція матиме відмінний вплив на загальний результат, тому знову вводиться ваговий коефіцієнт у вигляді відношення площі конкретної огорожувальної конструкції до загальної кондиціонованої площі:

$$T_{n,b} = \sum T_{n,in,x} \frac{S_x}{\sum S}, K \tag{11}$$

де S_x – площа конкретної огорожувальної конструкції, m^2 .

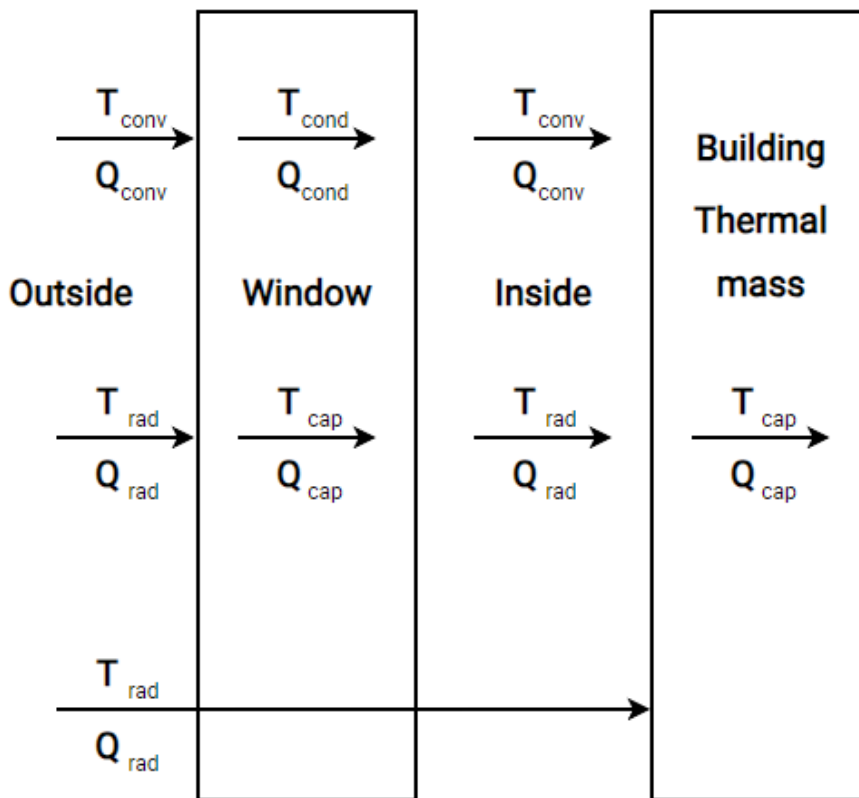


Рис. 3. Схема теплопередачі для вікна

```

for i in range(0, 20): # out wall calculations
    s_e_out.insert(i, s_1 * S_e * (T_street[i] - T_e_out[i]))
    T_e_out.insert(i+1, (T_street[i+1] - s_e_out[i] / (s_1 * S_e)))
    T_e_irr.insert(i, ((T_e_out[i]**4 + (T_e[i] * S_e / 3600) / (S_e * R_0))**(1/4)))
    T_e_out_w.insert(i, (T_e_out[i] * (abs(s_e_out[i]) / (abs(s_e_out[i]) + abs((I_e[i] * S_e / 3600))))
        + T_e_irr[i] * (abs((I_e[i] * S_e / 3600)) / (abs(s_e_out[i]) + abs((I_e[i] * S_e / 3600))))))

for i in range(0, 19): # first layer calculations
    l_e_1layer.insert(i, L_ins * S_e * (T_e_out_w[i] - T_e_1layer[i]) / B_1)
    C_e_1layer.insert(i, (C_ins * r_ins * B_1 * S_e * (T_e_out_w[i] - T_e_1layer[i])) / 3600)
    T_e_1layer.insert(i+1, ((T_e_out_w[i] - ((l_e_1layer [i] * B_1) / (L_ins * S_e))) * (abs(l_e_1layer[i]) / (2 * abs(l_e_1layer[i]) + 2 * abs(C_e_1layer[i]))))
        + ((T_e_out_w[i+1] - ((C_e_1layer[i] * 3600) / (C_ins * r_ins * B_1 * S_e))) *
            (abs(C_e_1layer[i]) / (2 * abs(C_e_1layer[i]) + 2 * abs(l_e_1layer[i]))))
        + ((T_e_out_w[i+1] - k_ins) * (abs(l_e_1layer[i]) / (2 * abs(C_e_1layer[i]) + 2 * abs(l_e_1layer[i]))))
        + ((T_e_1layer[i] - k_ins) * (abs(C_e_1layer[i]) / (2 * abs(C_e_1layer[i]) + 2 * abs(l_e_1layer[i]))))

for i in range(0, 14): # inside building calculations
    s_e_in.insert(i, s_5 * S_e * (T_e_5layer[i] - T_e_in[i]))
    T_e_in.insert(i, (T_e_5layer[i]**4 - T_e_in[i]**4) * S_e * R_in)
    C_e_in.insert(i, (C_w * r_w * B_in * S_in * (T_e_5layer[i] - T_e_in[i])) / 3600 + ((C_air * r_air * l * w * h) * (T_e_5layer[i] - T_e_in[i])) / 3600)
    T_e_in.insert(i+1, (T_e_5layer[i+1] - s_e_in[i] / (s_5 * S_e)) * (abs(s_e_in[i]) / (abs(s_e_in[i]) + abs(C_e_in[i]) + abs(I_e_in[i]))))
        + (T_e_5layer[i+1] - (C_e_in[i] * 3600) / (C_w * r_w * B_in * S_in + C_air * r_air * l * w * h)) *
            (abs(C_e_in[i]) / (abs(s_e_in[i]) + abs(C_e_in[i]) + abs(I_e_in[i]))))
        + ((T_e_5layer[i+1]**4 - T_e_in[i] / (S_e * R_in))**(1/4)) * (abs(I_e_in[i]) / (abs(s_e_in[i]) + abs(C_e_in[i]) + abs(I_e_in[i]))))

```

Рис. 4. Програмна реалізація розрахунку теплопередачі стіни

Результатом розрахунку за формулою (11) буде матриця точок, що складається з двох стовпців: температура та час. Знаючи всі ці значення, можна перейти до розрахунку енергопотреб за методом градусо-секунд. Енергопотреба опалення:

$$E_h = \frac{H_{tr}}{3600} \sum (T_h - T_{n,b}) \cdot (t_i - t_{i-1}), \text{ВТ год} \quad (12)$$

де T_h – встановлена температура опалення, К;

t_i – час, коли температура всередині будівлі має значення $T_{n,b}$; с;

H_{tr} – сумарний коефіцієнт теплопередачі теплопровідністю, Вт/К .

$$H_{tr} = H_D + H_g, \text{Вт/К} \quad (13)$$

де H_D – прямий узагальнений коефіцієнт теплопередачі теплопровідністю в зовнішнє середовище, Вт/К ;

H_g – стаціонарний коефіцієнт теплопередачі теплопровідністю до ґрунту.

$$H_x = \sum S_i \cdot U_i, \text{Вт/К} \quad (14)$$

де S_i – площа i -го елемента будівлі, м^2 ;

U_i – приведений коефіцієнт теплопередачі i -го елемента огорожувальної конструкції будівлі, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Формула для розрахунку енергопотреб кондиціонування:

$$E_c = \frac{H_{tr}}{3600} \sum (T_{n,b} - T_c) \cdot (t_i - t_{i-1}), \text{Wh}, \quad (15)$$

де T_c – встановлена температура охолодження, К.

```

if S_e_wd > 0:

for i in range(0, 13): # out wall calculations
    s_e_wd_out.insert(i, s_1 * S_e_wd * (T_street[i] - T_e_wd_out[i]))
    T_e_wd_out.insert(i+1, (T_street[i+1] - s_e_wd_out[i] / (s_1 * S_e_wd)))
    T_e_wd_irr.insert(i, ((T_e_wd_out[i]**4 + (I_e[i] * S_e_wd / 3600) / (S_e_wd * R_0))**(1/4)))
    T_e_wd_out_w.insert(i, (T_e_wd_out[i] * (abs(s_e_wd_out[i]) / (abs(s_e_wd_out[i]) + abs((I_e[i] * S_e_wd / 3600))))
        + T_e_wd_irr[i] * (abs((I_e[i] * S_e_wd / 3600)) / (abs(s_e_wd_out[i]) + abs((I_e[i] * S_e_wd / 3600))))))

for i in range(0, 12): # first layer calculations
    l_e_wd_1layer.insert(i, L_wd * S_e_wd * (T_e_wd_out_w[i] - T_e_wd_1layer[i]) / B_wd)
    C_e_wd_1layer.insert(i, (C_wd * m_wd * (T_e_wd_out_w[i] - T_e_wd_1layer[i])) / 3600)
    T_e_wd_1layer.insert(i+1, ((T_e_wd_out_w[i] - ((l_e_wd_1layer [i] * B_wd) / (L_wd * S_e_wd))) *
        (abs(l_e_wd_1layer[i]) / (2 * abs(l_e_wd_1layer[i]) + 2 * abs(C_e_wd_1layer[i]))))
        + ((T_e_wd_out_w[i+1] - ((C_e_wd_1layer[i] * 3600) / (C_wd * m_wd))) *
            (abs(C_e_wd_1layer[i]) / (2 * abs(C_e_wd_1layer[i]) + 2 * abs(l_e_wd_1layer[i]))))
        + ((T_e_wd_out_w[i+1] - k_e_wd) * (abs(l_e_wd_1layer[i]) / (2 * abs(C_e_wd_1layer[i]) + 2 * abs(l_e_wd_1layer[i]))))
        + ((T_e_wd_1layer[i] - k_e_wd) * (abs(C_e_wd_1layer[i]) / (2 * abs(C_e_wd_1layer[i]) + 2 * abs(l_e_wd_1layer[i]))))

for i in range(0, 11): # inside building calculations
    s_e_wd_in.insert(i, s_6 * S_e_wd * (T_e_wd_1layer[i] - T_e_wd_in[i]))
    T_e_wd_in.insert(i, (T_e_wd_1layer[i]**4 - T_e_wd_in[i]**4) * S_e_wd * R_wd_in)
    C_e_wd_in.insert(i, (C_w * r_w * B_in * S_in * (T_e_wd_1layer[i] - T_e_wd_in[i])) / 3600 +
        ((C_air * r_air * l * w * h) * (T_e_wd_1layer[i] - T_e_wd_in[i])) / 3600)
    T_e_wd_in.insert(i+1, (T_e_wd_1layer[i+1] - s_e_wd_in[i] / (s_6 * S_e_wd)) *
        (abs(s_e_wd_in[i]) / (abs(s_e_wd_in[i]) + abs(C_e_wd_in[i]) + abs(I_e_wd_in[i]))))
        + (T_e_wd_1layer[i+1] - (C_e_wd_in[i] * 3600) / (C_w * r_w * B_in * S_in + C_air * r_air * l * w * h)) *
            (abs(C_e_wd_in[i]) / (abs(s_e_wd_in[i]) + abs(C_e_wd_in[i]) + abs(I_e_wd_in[i]))))
        + (((T_e_wd_1layer[i+1]**4 - T_e_wd_in[i] / (S_e_wd * R_wd_in))**(1/4)) *
            (abs(I_e_wd_in[i]) / (abs(s_e_wd_in[i]) + abs(C_e_wd_in[i]) + abs(I_e_wd_in[i]))))

for i in range(0, 10): # inside building temperature including through-window radiation calculation
    T_e_wd_rad_in.insert(i, T_e_wd_in[i] * ((abs(s_e_wd_in[i]) + abs(C_e_wd_in[i]) + abs(I_e_wd_in[i])) /
        (abs(s_e_wd_in[i]) + abs(C_e_wd_in[i]) + abs(I_e_wd_in[i])) + abs((I_e[i] * S_e_wd / 3600))))
        + T_e_wd_irr[i] * (abs((I_e[i] * S_e_wd / 3600)) /
            (abs(s_e_wd_in[i]) + abs(C_e_wd_in[i]) + abs(I_e_wd_in[i]) + abs((I_e[i] * S_e_wd / 3600))))))

else: T_e_wd_rad_in = 0

```

Рис. 5. Програмна реалізація розрахунку теплопередачі стіни

Приведені вище формули є основою методу. По суті, кожна формула (1-10) формує певний блок теплопередачі, використовуючи який у правильній конфігурації, можна провести розрахунок енергопотреб для будь-якої будівлі.

Щоб перевірити дієздатність моделі, було вирішено порівняти енергоспоживання будівлі, визначене за методом, запропонованим у статті та розрахунком за державним стандартом [8]. Результати наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Структурно-механічні властивості м'ясної сировини

Енергопотреба, кВт×год	Опалення	Кондиціонування	Загальна
Розрахунок за ДСТУ	7890	3265	11155
Розрахунок за запропонованим методом	8048	2493	10543

Таким чином, подібність двох методів для визначення енергопотреби опалення склала 98%, для визначення енергопотреби охолодження – 76%, для визначення загальної енергопотреби – 95%. Такий результат дає змогу вважати запропонований метод валідним для подальших досліджень.

Висновки

У ході роботи, розроблено новий метод розрахунку енергопотреб будівлі, а також комп'ютерна система, в якому він програмно реалізований за допомогою мови програмування Python. Основою розробленого метода стали формули розрахунку теплопровідності, конвекції, теплового випромінювання та теплоємності. За структурою своєї реалізації, запропонований метод подібний до числових методів, де розрахунок просувається поступово за двома координатами: просторовою та часовою, а також, у деяких формулах, подібно до методу кінцевих елементів, застосовуються вагові коефіцієнти. Валідність використання методу доведена порівнянням результату розрахунку енергопотреб з його допомогою із розрахунком за допомогою метода, що описаний в державному стандарті.

Література

31. Recktenwald G.W. Finite-difference approximations to the heat equation. Mechanical Engineering. № 1. Portland State University. 2004. p. 27.
32. Dr. Cüneyt Sert. Finite Element Analysis in Thermofluid. https://users.metu.edu.tr/csirt/teaching_notes.htm.
33. Benyam M. Numerical Solution of a One Dimensional Heat Equation with Dirichlet Boundary Conditions. American Journal of Applied Mathematics. № 3. 2015. p. 305-311. <https://doi.org/10.11648/j.ajam.20150306.20>.
34. LingDe Su. A radial basis function (RBF)-finite difference (FD) method for the backward heat conduction problem. Applied Mathematics and Computation. № 354. 2019. p. 232–247. ISSN 0096-3003, <https://doi.org/10.1016/j.amc.2019.02.035>.
35. Batool S., Rasool G., Alshammari N., Khan I., Kaneez H., Hamadneh N. Numerical analysis of heat and mass transfer in micropolar nanofluids flow through lid driven cavity: Finite volume approach. Case Studies in Thermal Engineering. № 37. 2022, 102233, ISSN 2214-157X, <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102233>.
36. Çengel Y.A. Introduction to thermodynamics and heat transfer. 2-nd edition. 2009. 865 p.
37. Сокол К.І. Проектування комп'ютерної системи для дослідження теплового режиму будівлі з пасивною системою опалення закритого типу / К.І.Сокол, О.Є. Огнева, О.В. Андропова // Вісник Херсонського національного технічного університету. Інформаційні технології. – ХНТУ, 2022. – № 1(80). – С. 61-67. – <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2022.1>.
38. ДСТУ Б А.2.2-12 2015. Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання при опаленні, охолодженні, вентиляції, освітленні та гарячому водопостачанні. – [Чинний від 2016-01-01]. – К. : ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій»; ТК 302 «Енергоефективність будівель і споруд», ПК4 «Енергетична паспортизація будівель», 2016. – 145 с.

References

1. Recktenwald G.W. Finite-difference approximations to the heat equation. Mechanical Engineering. № 1. Portland State University. 2004. p. 27.
2. Dr. Cüneyt Sert. Finite Element Analysis in Thermofluid. https://users.metu.edu.tr/csirt/teaching_notes.htm.
3. Benyam M. Numerical Solution of a One Dimensional Heat Equation with Dirichlet Boundary Conditions. American Journal of Applied Mathematics. № 3. 2015. p. 305-311. <https://doi.org/10.11648/j.ajam.20150306.20>.
4. LingDe Su. A radial basis function (RBF)-finite difference (FD) method for the backward heat conduction problem. Applied Mathematics and Computation. № 354. 2019. p. 232–247. ISSN 0096-3003, <https://doi.org/10.1016/j.amc.2019.02.035>.
5. Batool S., Rasool G., Alshammari N., Khan I., Kaneez H., Hamadneh N. Numerical analysis of heat and mass transfer in micropolar nanofluids flow through lid driven cavity: Finite volume approach. Case Studies in Thermal Engineering. № 37. 2022, 102233, ISSN 2214-157X, <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102233>.
6. Çengel Y.A. Introduction to thermodynamics and heat transfer. 2-nd edition. 2009. 865 p.
7. Sokol K.I. Proektuvannia kompiuternoi systemy dlia doslidzhennia teplovoho rezhymu budivli z pasyvnoiu systemoiu opalennia

zakrytoho typu / K.I.Sokol, O.Ie. Ohnieva, O.V. Andronova // Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Informatsiini tekhnologii. – KhNTU, 2022. – № 1(80). – S. 61-67. – <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2022.1>.

8. DSTU B A.2.2-12 2015. Enerhetychna efektyvnist budivel. Metod rozrakhunku enerhospozhyvannia pry opalenni, okholodzhenni, ventyliatsii, osvitlenni ta hariachomu vodopostachanni. – [Chynnyi vid 2016-01-01]. – K. : DP «Derzhavnyi naukovo-doslidnyi instytut budivelnykh konstruksii»; TK 302 «Enerhoefektyvnist budivel i sporud», PK4 «Enerhetychna pasportyzatsiia budivel», 2016. – 145 s.