

УДК 004.9:536.2

## ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ОЦІНЮВАННЯ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЇ БАГАТОШАРОВИХ СТІН

Рачинська А. Л.<sup>1</sup>, Царенко О. П.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Одеський національний університет імені І.І.Мечникова

**Анотація.** В умовах сьогодення проблема ізоляції поверхонь є дуже актуальною для широких кіл населення України. Всім відомо, що ізоляція поверхні дозволяє зменшити тепловіддачу за рахунок використання матеріалів із низькою теплопровідністю. У разі відсутності постійного опалення дуже актуальним є питання теплоізоляції циліндричних труб. Питання підбору ізоляції та розробки конструктиву потребує комплексного та професійного підходу. Для розрахунку задачі теплоізоляції фахівцю необхідно мати інструментарій для проведення розрахунку температурного поля із збереженням отриманих результатів для подальшого аналізу.

У роботі представлено розроблену інформаційну технологію, що дозволяє фахівцю проводити розрахунок температурного поля для багатошарових циліндричних труб. Для побудови інструментарію ІТ використовувалася об'єктно-орієнтована мова програмування C# та інтегроване середовище розробки Microsoft Visual Studio.

Слід зазначити, що при проведенні розрахунків немає необхідності задавати характеристики матеріалів труб та ізоляції, оскільки всі дані зберігаються у БД ІТ. Для побудови модуля даних використовувалася об'єктно-реляційна система управління базами даних – PostgreSQL. Після проведення розрахунків усі побудовані розрахункові моделі та отримані числові моделі результатів так само зберігаються у БД. Це дозволяє в разі потреби не проводити повторний розрахунок, а використовувати дані, що вже є.

Для аналізу результатів розроблений інструментарій дозволяє будувати графіки зміни температури багатошарової стінки. При цьому вибір необхідних розрахункових моделей користувач здійснює самостійно з даних БД ІТ. Для візуальної наочності розрахунків числової моделі використовують пакет засобів розробки тривимірної графіки DirectX. Авторами розроблено алгоритм побудови кольорового температурного поля згідно з проведеними розрахунками. Для найвищої температури поля вибирається червоний колір, а найнижчої температури – синій.

Особливістю запропонованої інформаційної технології є те, що її функціонал дозволяє працювати з інструментарієм трьом користувачам із різним рівнем доступу: адміністратору БД, інженеру побудови математичних моделей та фахівцеві аналізу числових моделей.

**Ключові слова:** інформаційна технологія, бази даних, температурне поле, теплопровідність, багатошарова циліндрична труба.

## INFORMATION TECHNOLOGY FOR ASSESSING THERMAL INSULATION OF MULTI-LAYER WALLS

A. Rachinska, O. Tsarenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Odesa I.I. Mechnikov National University

**Abstract.** In today's conditions, the problem of insulation of surfaces is very relevant for wide circles of the population of Ukraine. Everyone knows that surface insulation allows to reduce heat transfer due to the use of materials with low thermal conductivity. In the absence of permanent heating, the issue of thermal insulation of cylindrical pipes is very relevant. The issue of insulation selection and structural design requires a complex and professional approach. To calculate the problem of thermal insulation, a specialist needs to have a toolkit for calculating the temperature field and saving the obtained results for further analysis.



The work presents the developed information technology that allows a specialist to calculate the temperature field for multilayer cylindrical pipes. The object-oriented programming language C# and the Microsoft Visual Studio integrated development environment were used to build the IT toolkit.

It should be noted that when making calculations, there is no need to specify the characteristics of pipe and insulation materials, since all data is stored in the IT database. The object-relational database management system - PostgreSQL was used to build the data module. After the calculations, all the built calculation models and the received numerical models of the results are also stored in the database. This allows you not to recalculate if necessary, but to use the data that is already available.

To analyze the results, the developed toolkit allows you to plot temperature changes of a multilayer wall. At the same time, the user selects the necessary calculation models independently from IT database data. The DirectX three-dimensional graphics development tool package is used for visual representation of numerical model calculations. The authors developed an algorithm for constructing a color temperature field according to the calculations. Red is chosen for the highest field temperature, and blue for the lowest temperature.

A feature of the proposed information technology is that its functionality allows three users with different levels of access to work with the toolkit: a database administrator, a mathematical model construction engineer, and a numerical model analysis specialist.

**Keywords:** information technology, databases, temperature field, thermal conductivity, multilayer cylindrical pipe.

## 1 ВСТУП

Розрахунок процесів теплопровідності є одним із важливих розділів сучасних інженерних досліджень у технологічних процесах. Широке застосування у всіх галузях промисловості та господарської діяльності людини має теплова ізоляція. Її правильне застосування значною мірою визначає можливість підтримки необхідних технологічних процесів і зрештою робить вирішальний вплив на показники енергоефективності та експлуатації.

Зростання вартості енергії та нові вимоги сьогодення до теплового захисту існуючих будівель та теплотрас визначає необхідність використання інформаційних технологій розрахунку ізоляції багат шарових конструкцій.

## 2 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ І ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Більшість технологічних процесів здійснюються з виділенням або поглинанням теплоти. Інженер у своїй діяльності має справу з різними тепловими процесами і їх конструктивним оформленням у вигляді теплотехнічного обладнання, яке вбудоване в технологічні процеси. Тому він повинен вміти грамотно і ефективно використовувати таке обладнання, керувати теплоенергетичними схемами у виробництві за допомогою інформаційних технологій. Фахівець повинен добре знати теплові процеси та проводити розрахунок технічних конструкцій, що використовуються на практиці.

Проблемі розрахунку процесів теплопровідності присвячено багато робіт сучасних інженерних досліджень в машинобудівній та атомній промисловості, в технологічних процесах теплоенергетичних галузей господарської діяльності.

В [1-4] розглянуто проблему теплопровідності багат шарових стін різної форми. Отримані математичні моделі теплопровідності плоскої, циліндричної та сферичної стін.

Розглянемо багат шарове тіло простої форми, що складається з однорідних шарів, між якими має місце ідеальний тепловий контакт. Будемо вважати, що температура тіла, що розглядається, змінюється вздовж однієї координати, а теплопровідність  $\lambda_i$  ( $i=1,2,\dots,m$ ) кожного з шарів постійна. У цьому випадку тепловий потік, що проходить через будь-яку ізотермічну поверхню тіла, дорівнює:  $Q = Q_i = \text{const}$ .

Нехай на поверхнях, що обмежують тіло, задані граничні умови III-го роду, а температури зовнішніх середовищ  $T_{C_1}$  і  $T_{C_2}$  підпорядковуються нерівності  $T_{C_1} > T_{C_2}$ . Позначимо температури граничних шарів  $T_{S_i}$ , розміри кожного шару вважаємо заданими. Вочевидь, температури зовнішніх поверхонь тіла мають індекси «1» і «m+1».

Через постійність теплових потоків на ізотермічних поверхнях для зовнішніх меж тіла можна записати

$$Q = \alpha_1 S_1 (T_{C_1} - T_{S_1}), \quad Q = \alpha_2 S_{m+1} (T_{S_{m+1}} - T_{C_2}), \quad (1)$$

де  $\alpha_1, \alpha_2$  - коефіцієнт тепловіддачі внутрішнього та зовнішнього шару з середовищем відповідно, а  $S_i$  - площа і-ої поверхні.

Такий же тепловий потік передається через кожен із шарів багат шарового тіла. Тоді відповідно до закону Фур'є отримаємо

$$Q = \frac{\lambda_i (T_{S_i} - T_{S_{i+1}})}{\int_{n_i}^{n_{i+1}} \frac{dn}{S(n)}}, \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (2)$$

Позначимо

$$\int_{n_i}^{n_{i+1}} \frac{dn}{S(n)} = N_{n_i}^{n_{i+1}} = F_i$$

та об'єднаємо рівності (1) та (2) у систему рівнянь

$$\left\{ \begin{array}{l} Q = \alpha_1 S_1 (T_{C_1} - T_{S_1}), \\ Q = \lambda_1 \frac{(T_{S_1} - T_{S_2})}{F_1}, \\ Q = \lambda_2 \frac{(T_{S_2} - T_{S_3})}{F_2}, \\ \dots \\ Q = \lambda_m \frac{T_{S_m} - T_{S_{m+1}}}{F_m}, \\ Q = \alpha_2 S_{m+1} (T_{S_{m+1}} - T_{C_2}), \end{array} \right. \quad \text{або} \quad \left\{ \begin{array}{l} T_{C_1} - T_{S_1} = \frac{Q}{\alpha_1 S_1}, \\ T_{S_1} - T_{S_2} = \frac{F_1}{\lambda_1} Q, \\ T_{S_2} - T_{S_3} = \frac{F_2}{\lambda_2} Q, \\ \dots \\ T_{S_m} - T_{S_{m+1}} = \frac{F_m}{\lambda_m} Q, \\ T_{S_{m+1}} - T_{C_2} = \frac{Q}{\alpha_2 S_{m+1}}. \end{array} \right. \quad (3)$$

Складемо почленно праві та ліві частини рівнянь (3) та отримаємо наступне вираження для теплового потоку:

$$Q = \eta_* \cdot (T_{C_1} - T_{C_2}), \quad \eta_* = \left( \frac{1}{\alpha_1 S_1} + \sum_{i=1}^m \frac{F_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2 S_{m+1}} \right)^{-1}. \quad (4)$$

Величину  $\eta_*$  називають повним коефіцієнтом теплопередачі багат шарової стінки. Вираз (4) для теплового потоку  $Q$  через багат шарову стінку подібно до виразу теплового потоку для одно шарової стінки. Відмінність полягає лише в записі коефіцієнта теплопередачі стінки, причому одно шарова стінка є окремий випадок (4) при  $m = 1$ . Для зручності порівняння процесів теплопровідності в багат шаровій та однорідній стінках вводять еквівалентну теплопровідність багат шарової стінки

$$\lambda_{ек} = \frac{\sum_{i=1}^m F_i}{\sum_{i=1}^m \frac{F_i}{\lambda_i}}. \quad (5)$$

Використовуючи це позначення, рівність (4) можна записати у вигляді, що формально збігається з виразом теплового потоку для однорідної стінки:

$$Q = (T_{C_1} - T_{C_2}) \left/ \left( \frac{1}{\alpha_1 S_1} + \frac{N_{n_i}^{n_{m+1}}}{\lambda_{ек}} + \frac{1}{\alpha_2 S_{m+1}} \right) \right.$$

Однак коефіцієнт  $\lambda_{ек}$  тут вже не є константою, а залежить, як це впливає з (5), від числа шарів, їх теплопровідностей та розмірів, а також від геометричної форми

багат шарової стінки. Вирішуючи систему рівнянь (3), отримуємо, що температури на межах шарів  $S_i$  та на зовнішніх поверхнях стінки  $S_1$  й  $S_{m+1}$  визначаються виразами:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{S_1} = T_{C_1} - Q \frac{1}{\alpha_1 S_1}, \\ T_{S_2} = T_{C_1} - Q \left[ \frac{1}{\alpha_1 S_1} + \frac{F_1}{\lambda_1} \right], \\ \dots \\ T_{S_{i+1}} = T_{C_1} - Q \left[ \frac{1}{\alpha_1 S_1} + \sum_{k=1}^i \frac{F_k}{\lambda_k} \right], \\ \dots \\ T_{S_m} = T_{C_1} - Q \left[ \frac{1}{\alpha_1 S_1} + \sum_{k=1}^{m-1} \frac{F_k}{\lambda_k} \right], \\ T_{S_{m+1}} = T_{C_2} + Q \frac{1}{\alpha_2 S_{m+1}}. \end{array} \right. \quad (6)$$

Розподіли температур у кожному конкретному шарі знаходяться з використанням формули

$$T = T_{S_1} - (T_{S_1} - T_{S_2}) \frac{N_{n_1}^n}{N_{n_1}^{n_2}},$$

де в якості температур на межі шару беруться значення (6).

### 3 ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Проведемо дослідження для циліндричної багат шарової стінки:

$$F_i = \frac{1}{2\pi L} \ln \left( \frac{r_{i+1}}{r_i} \right), \quad S_i = 2\pi r_i L = \pi L d_i^2.$$

Підставляючи ці значення до рівності (4)-(6), отримуємо такі розрахункові формули:

- для потоку теплоти, що проходить через одиницю довжини циліндричної стінки:

$$q_L = \frac{Q}{L} = \pi \tilde{\eta}_z (T_{C_1} - T_{C_2}) = \frac{1}{\tilde{R}_z} \pi (T_{C_1} - T_{C_2}), \quad (7)$$

де  $\tilde{\eta}_z$  - коефіцієнт теплопередачі багат шарової циліндричної стінки, а

$$\tilde{R}_z = \frac{1}{\tilde{\eta}_z} = \frac{1}{\alpha_1 d_1} + \sum_{i=1}^m \frac{1}{2\lambda_i} \ln \left( \frac{d_{i+1}}{d_i} \right) + \frac{1}{\alpha_2 d_{m+1}} - \text{повний термічний опір теплопередачі}$$

багат шарової циліндричної стінки;

- для температур на межах шарів:

$$T_{S_{i+1}} = T_{C_1} - \frac{q_L}{\pi} \left( \frac{1}{\alpha_1 d_1} + \sum_{k=1}^i \frac{1}{2\lambda_k} \ln \left( \frac{d_{k+1}}{d_k} \right) \right), \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad (8)$$

- для температури на зовнішній межі  $S_{m+1}$  циліндричної стінки

$$T_{S_{m+1}} = T_{C_1} - \frac{q_L}{\pi} \left( \frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda_{ек}} \ln \left( \frac{d_{m+1}}{d_1} \right) \right), \quad (9)$$

де  $\lambda_{ек} = \ln \left( \frac{d_{m+1}}{d_1} \right) / \sum_{i=1}^m \frac{1}{\lambda_i} \ln \left( \frac{d_{i+1}}{d_i} \right)$  - еквівалентна теплопровідність багат шарової циліндричної стінки.

В роботі ставиться ціль для існуючої математичної моделі (7)-(9) побудувати інформаційну технологію розрахунку температурного поля циліндричної багат шарової стінки. Розроблена інформаційна технологія може бути використана фахівцями для розрахунку технічних конструкцій, що використовуються на практиці.

Для досягнення цілі необхідно розглянути наступні задачі:

- задача розробки архітектурного рішення інформаційної технології;
- задача візуалізації температурного поля циліндричної багат шарової стінки;
- задача оптимального збереження вхідних та вихідних даних.

#### 4 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

В роботі побудовано інформаційну технологію [5-6] розрахунку температурного поля циліндричної багат шарової стінки з архітектурним рішенням виду [7]:

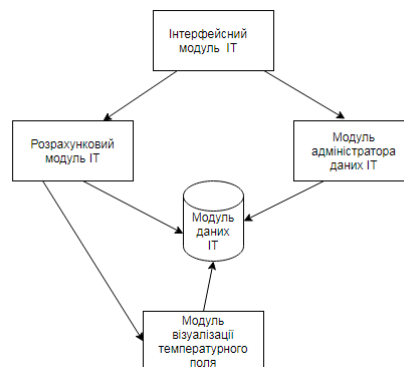


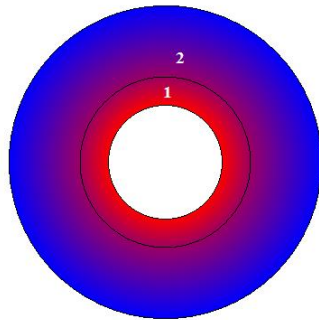
Рис.1. Архітектура інформаційної технології розрахунку

Побудована ІТ дозволяє за допомогою інтерфейсного модуля створювати різні математичні моделі циліндричної багат шарової стіни. Під час побудови математичної моделі в інтерфейсному модулі обирається, по-перше, матеріал кожного шару, а його характеристики завантажують з БД модуля даних. Модифікація БД [8] характеристик матеріалів виконується за допомогою модуля адміністратора даних ІТ. По-друге, в інтерфейсному модулі задаються температури зовнішнього та внутрішнього шарів стіни та від відстані до центру циліндричної труби для кожного шару. Побудована математична модель зберігається в БД модуля даних, якщо такої моделі в БД ще не існує.

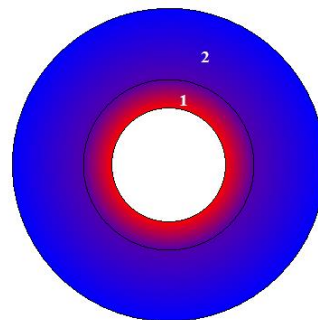
Розрахунковий модуль ІТ отримує чисельний результат температурного поля побудованої математичної моделі у вигляді розрахункової моделі, яка буде внесена до модуля даних у якості вхідних даних, якщо такий розрахунок робиться вперше.

Результати чисельного дослідження візуалізуються за допомогою відповідного графічного модуля [9-10]. Інтерфейсний модуль має функціонал, що дозволяє аналізувати існуючі математичні та розрахункові моделі без нового розрахунку.

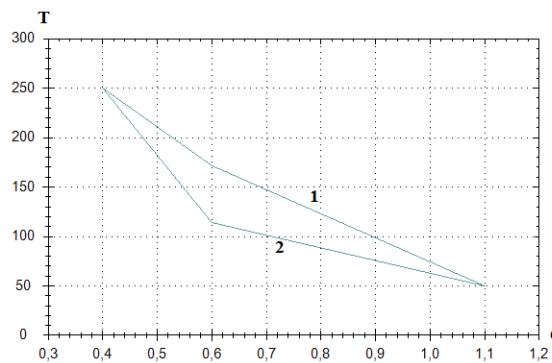
На рис. 2-5 представлено температурне поле та графік залежності температури від відстані до центру циліндричної труби для різних моделей багат шарової циліндричної стінки. Червоний колір відповідає більш високим температурам, а синій – більш низьким.



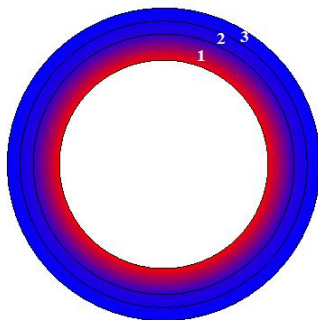
**Рис. 2.** Температурне поле двошарової труби: алюміній – повсть



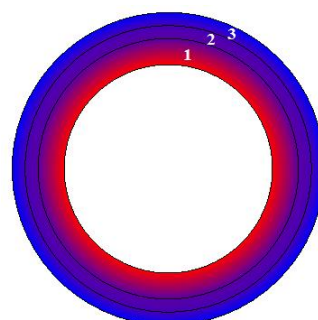
**Рис. 3.** Температурне поле двошарової труби: поліпропілен – азбест



**Рис. 4.** Графік зміни температури в залежності від відстані до центру двошарової труби



**Рис. 5.** Температурне поле тришарової труби: поліпропілен – азбест-масляна краска



**Рис. 6.** Температурне поле тришарової труби: алюміній – масляна краска – повсть

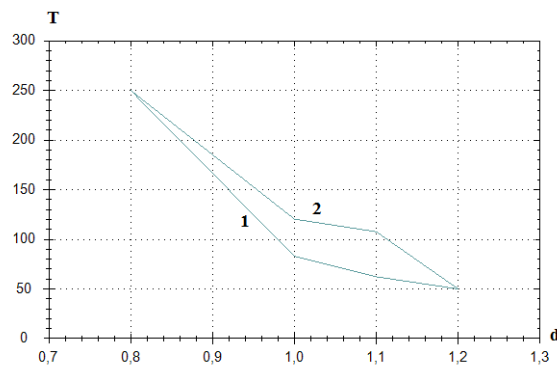


Рис. 7. Графік зміни температури в залежності від відстані до центру тришарової труби

## 5 ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

На рис. 4 представлено графік зміни температури ( $^{\circ}\text{C}$ ) двошаровій стіні для різних матеріалів. Крива 1 відповідає температурному полю рис.2, в крива 2 – температурному полю рис.3. При проведенні обчислення моделі задавалися наступні параметри: температура внутрішнього середовища  $T_{C_1} = 250^{\circ}\text{C}$ , температура зовнішнього середовища  $T_{C_2} = 50^{\circ}\text{C}$ , геометрія конструкції –  $d_1 = 0.4\text{ м}$ ,  $d_2 = 0.6\text{ м}$ ,  $d_3 = 1.1\text{ м}$ , коефіцієнти тепловіддачі  $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$ .

Проведено чисельний експеримент для тришарової циліндричної труби для тих самих параметрів зовнішнього та внутрішнього середовищ. Геометрія конструкції:  $d_1 = 0.8\text{ м}$ ,  $d_2 = 1.0\text{ м}$ ,  $d_3 = 1.2\text{ м}$ ,  $d_4 = 1.3\text{ м}$ . На рис.7 представлено графік зміни температури ( $^{\circ}\text{C}$ ) тришаровій стіні для різних матеріалів. Крива 1 відповідає температурному полю рис.5, в крива 2 – температурному полю рис.6.

Видно, що при однаковій геометрії конструкції для більш сучасного матеріалу циліндричних труб – поліпропілену, теплоізоляція конструкції досягається краще, навіть при використанні азбесту.

## 6 ВИСНОВКИ

Розроблено інформаційну технологію дослідження багатошарової циліндричної стіни, яка може бути використана фахівцями для розрахунку та дослідження температурного поля циліндричних труб.

Функціонал інтерфейсного модуля дозволяє інтуїтивно просто провести процес моделювання задачі для користувача без спеціальної підготовки. Всі розраховані моделі зберігаються в базі даних програмного забезпечення ІТ. Використання тривимірної графіки дає можливість візуалізувати розраховане температурне поле.

Особливістю розробленої інформаційної технології є те, що в ній є три незалежні функціональні модулі: робота з базою даних, побудова моделі та аналіз даних. Це дозволяє використовувати її трьом користувачам для вирішення різних задач дослідження.

## Література

1. Лабай В. Й. Тепломасообмін. Львів: Тріада Плюс, 2004. 258 с.
2. Погорелов А. І. Тепломасообмін. Львів: Новий Світ, 2006. 144 с.
3. Лыков В. А. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 600 с.
4. Беляев Н. М. Основы теплопередачи. К.: Выща шк. Головное изд-во, 1989. 343 с.



5. Peter Bernus, Kai Mertins, Gunter Schmidt. Handbook on Architectures of Information Systems. Berlin: Springer, 2016. 886 p.
6. Авраменко В.С., Авраменко А.С. Проектування інформаційних систем. Черкаси: Черкаський національний університет ім. Б. Хмельницького, 2017. 434 с.
7. Daniel Solis. Illustrated C# 2012. Berkeley: APress, 2012. 732 p.
8. Elmasri R., Navathe S. B. Fundamentals of Database Systems. Pearson, 2015. 1280 p.
9. Маценко В. Г. Комп'ютерна графіка. Чернівці: Рута, 2009. 343 с.
10. Пічугін М. Ф., Канкін І. О., Воротніков В. В. Комп'ютерна графіка. Київ: Центр учбової літ., 2013. 346 с.

## References

1. Labay V. Y. (2004). *Teplomasoobmin*. [Heat and mass transfer]. (monograph). Lviv: Triada Plus. [in Ukraine].
2. Pogorelov A.I. (2006). *Teplomasoobmin*. [Heat and mass transfer]. (monograph). Lviv: New World. [in Ukraine].
3. Lykov V. A. (1967). *Teoriya teploprovodnosti*. [Theory of thermal conductivity]. (monograph). M.: Higher School. [in Russian].
4. Belyaev N. M. (1989). *Osnovy teploperedachi*. [Fundamentals of heat transfer]. (monograph). K.: High school. Head publishing house. [in Russian].
5. Peter Bernus, Kai Mertins, Gunter Schmidt. (2016). *Handbook on Architectures of Information Systems*. (monograph). Berlin: Springer.
6. Avramenko V.S., Avramenko A.S. (2017). *Proektuvannya informacijnih system*. [Design of information systems]. (monograph). Cherkasy: Cherkasy National University named after. B. Khmelnytsky. [in Ukraine].
7. Daniel Solis. (2012). *Illustrated C# 2012*. (monograph). Berkeley: APress.
8. Elmasri R., Navathe S. B. (2015). *Fundamentals of Database Systems*. (monograph). Pearson.
9. Matsenko V. G. (2009). *Komp'yuterna grafika*. [Computer graphics]. (monograph). Chernivtsi: Ruta. [in Ukraine].
10. Pichugin M.F., Kankin I.O., Vorotnikov V.V. (2013). [Computer graphics]. (monograph). Kyiv: Center for educational literature. [in Ukraine].

### **Рачинська Алла Леонідівна**

Одеський національний університет імені І.І. Мечникова  
к.ф.-м.н., доцент  
вул. Дворянська, 2 Одеса, Україна 65082  
[rachinskaya@onu.edu.ua](mailto:rachinskaya@onu.edu.ua),  
ORCID: 0000-0003-2430-9603

### **Царенко Олексій Павлович**

Одеський національний університет імені І.І. Мечникова  
старший викладач  
вул. Дворянська, 2 Одеса, Україна 65082  
[tsarenko@onu.edu.ua](mailto:tsarenko@onu.edu.ua),  
ORCID: 0000-0001-8023-1236

### *Для посилань:*

Рачинська А. Л., Царенко О. П. Інформаційна технологія оцінювання теплоізоляції багатошарових стін. Механіка та математичні методи, 2023. Т. V. №. 2. С. 71–79.

### *For references:*

A. Rachinska, O. Tsarenko (2023). Information technology for assessing thermal insulation of multi-layer walls. Mechanics and Mathematical methods. V(2). 71–79.