

УДК 614.841.12:539.377

DOI: <https://doi.org/10.31731/2524-2636.2021.5.1.-115-122>

*Михайло Семерак, д-р техн. наук, професор, (ORCID: 0000-0002-7582-6398),
Національний університет «Львівська політехніка»,
Микола Михайлишин (ORCID: 0000-0002-6269-4015),
Іван Несен (ORCID: 0000-0001-5847-4805),
Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля
Національного університету цивільного захисту України*

АНАЛІТИЧНИЙ МЕТОД РОЗВ'ЯЗАННЯ АКТУАЛЬНИХ ЗАДАЧ ТЕПЛООБМІНУ

В статті запропоновано аналітичний метод розв'язання задач теплообміну. В роботі змодельовано пожежу вертикального сталевго резервуару та обчислено тепловий вплив факела полум'я на сталеву колону, яка розташована поруч із резервуаром. При цьому наглядно продемонстровано як врахувати при розрахунках зміну теплового потоку із плином часу. В результаті обчислень отримано графічні залежності температури на поверхні сталевго колони в залежності від часу, які дозволяють порівняти результати обчислень при стаціонарному тепловому потоці та змінному із плином часу.

Ключові слова: теплообмін, тепловий потік, рівняння Стефана-Больцмана, диференціальне рівняння теплопровідності.

Постановка проблеми. В пожежній справі актуальними є задачі на визначення теплообміну між різними об'єктами, скажімо розрахунок теплового впливу пожежі на елементи будівель, конструкцій чи споруд. В науковій літературі часто зустрічаються задачі, в яких визначається вплив факела полум'я на різні об'єкти, наприклад несучі стіни будівлі, тіло людини, трубопроводи тощо [1, 2]. Здебільшого розв'язок цих задач зводиться до визначення часу, за який досліджуваний об'єкт нагріється до критичної температури або до визначення максимальної температури, до якої може нагрітися об'єкт за певний проміжок часу.

Оскільки при пожежі лівова частка теплообміну між полум'ям та навколишнім середовищем припадає на променевий теплообмін, то в більшості випадків задачі на теплообмін між факелом пожежі та оточуючими об'єктами зводяться до визначення інтенсивності теплового випромінювання. При таких розрахунках використовують формулу Стефана-Больцмана [3]:

$$q_{2-1} = \varepsilon_{\text{заг}} \psi \cdot 5.67 \left[\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \right], \quad (1)$$

де q_{2-1} – інтенсивність теплового випромінювання, що сприймає тіло 1 від факела полум'я 2, $\text{кВт} / \text{м}^2$; $\varepsilon_{\text{заг}} = \left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)^{-1}$ – узагальнений ступінь чорноти системи тіл (тіло, що нагрівається і факел полум'я); ε_1 – ступінь чорноти факела полум'я; ε_2 – ступінь чорноти поверхні тіла, що нагрівається; ψ – кутовий коефіцієнт випромінювання; T_2 – температура факела полум'я, К ; T_1 – температура поверхні тіла, що нагрівається, К .

Знаючи геометричні розміри полум'я та тіла, що нагрівається, їх взаємне розміщення в просторі (що враховує коефіцієнт ψ), їх оптичні властивості (що враховує $\varepsilon_{\text{заг}}$) можемо

розрахувати яка кількість тепла поглинатиметься тілом з початковою температурою T_1 від полум'я з температурою T_2 за одну секунду.

З формули (1) видно, що інтенсивність теплового випромінювання q_{2-1} явно не залежить від часу. Проте q_{2-1} залежить від температури тіла T_1 , яка в свою чергу залежить від часу, оскільки з плином часу температура тіла T_1 буде збільшуватися під впливом факела полум'я. Звідси постає питання: як визначити інтенсивність теплового потоку між тілами враховуючи те, що температура тіла T_1 є нестационарною (змінюється з плином часу)?

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогоднішній день існує багато методів для розв'язання таких задач. Одним із таких методів є використання комп'ютерних програм типу «ANSYS CFX», «SOFIE», «FLOW-3D» тощо [4]. Проте вказане програмне забезпечення може бути дорогавартісним, що в свою чергу робить його малодоступним для багатьох науковців. Метод, запропонований нами, є простим і абсолютно доступним кожному.

Мета статті. Вдосконалити аналітичний метод розв'язання задач теплообміну шляхом підвищення точності результатів обчислень.

Виклад основного матеріалу. В чому ж полягає суть запропонованого методу? Для прикладу розглянемо наступну задачу.

Пожежа на нафто-хімічному підприємстві. Горить вертикальний сталевий резервуар (РВС) ємністю 500 м^3 , заповнений мазутом. На відстані 5 м від резервуару знаходиться сталеві колона діаметром 1 м пустотіла, з товщиною стінки 20 мм (рис. 1). Потрібно визначити час, за який сталеві колона нагріється до критичної температури – $550 \text{ }^\circ\text{C}$ (823 K).

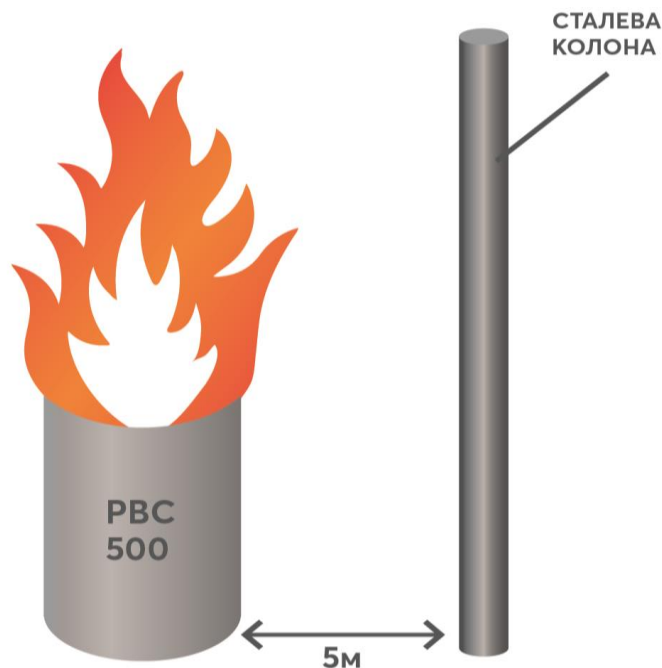


Рисунок 1 – Схематичне зображення пожежі

Для розв'язку задачі приймемо:

$T_2=1273 \text{ K}$ – температура факела полум'я при горінні мазуту в резервуарах;

$T_1=293 \text{ K}$ – початкова температура факела полум'я при горінні мазуту в резервуарах;

$\varepsilon_1 = 0,95$ – ступінь чорноти сталі; $\varepsilon_2 = 0,85$ – ступінь чорноти факела полум'я.

Для визначення інтенсивності теплового випромінювання, яке сприймає колона, скористаємось формулою (1), де кутовий коефіцієнт випромінювання $\psi = 0,35$ та визначається з графіку (рис. 2) [5].

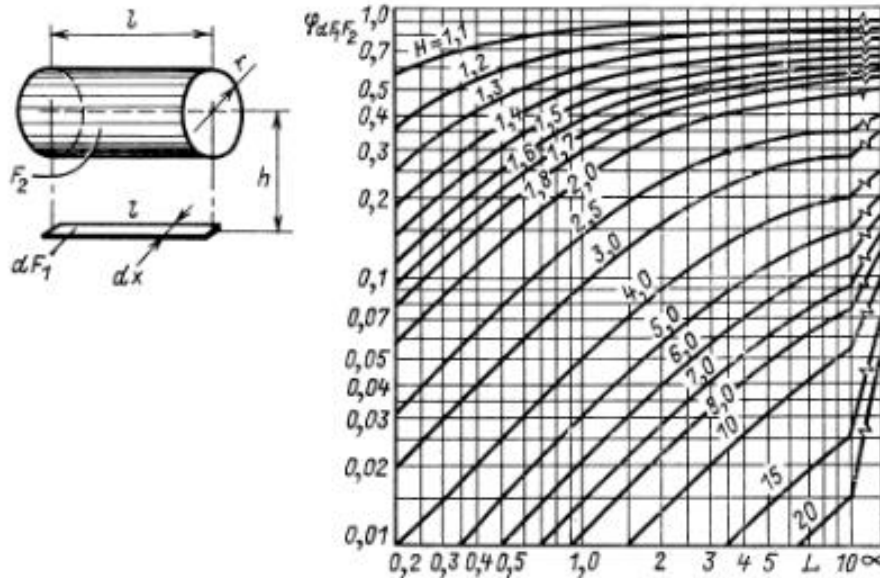


Рисунок 2 – Графік для визначення кутового коефіцієнта

Для випадку, що розглядається, $L=l/r$, $H=h/r$. Підставивши значення ψ у формулу (1), отримаємо розв'язок, який представлено графічно на рис. 3.

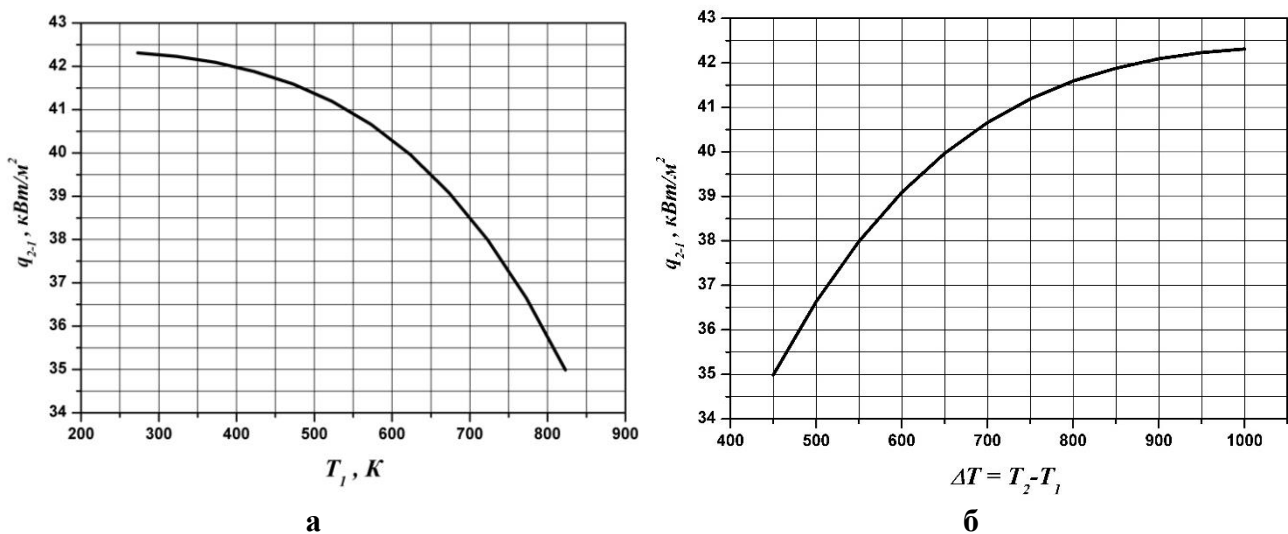


Рисунок 3 – **а** – залежність інтенсивності теплового випромінювання від температури сталеві колони; **б** – залежність інтенсивності теплового випромінювання від різниці температур ΔT факела полум'я та поверхні сталеві колони

Як видно з графіку **б**, інтенсивність теплового потоку, який сприймає сталеві колони – q_{2-1} , буде зменшуватися при зменшенні різниці температур ΔT . Температура факела полум'я T_2 є стаціонарною, тобто незмінною з плином часу, а температура сталеві колони T_1 є нестаціонарною. З плином часу T_1 буде зростати, оскільки сталеві колони нагріватиметься під впливом факела полум'я. Згідно другого закону термодинаміки сталеві колони може нагрітися до максимальної температури, яка не перевищуватиме температуру факела полум'я T_2 . Проте загальновідомо, що сталеві конструкції при нагріванні до температури $550\text{ }^\circ\text{C}$ (823 K) втрачають свою несучу здатність. Тобто максимальна температура, до якої може

нагрітися колона – 550 °C (823 K), оскільки нагрівшись до такої температури колона втратить несучу здатність.

Знаючи кількість тепла, яку поглинає сталева колона можемо визначити температурний розподіл по товщині стінки колони. Для знаходження розподілу температури по товщині стінки колони знайдемо розв'язок диференціального рівняння теплопровідності [6]:

$$\frac{\partial T_1(r, \tau)}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T_1(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_1(r, \tau)}{\partial r} \right), \quad (2)$$

з початковою умовою

$$T_1(r, 0) = T_0, \quad (3)$$

та граничною умовою другого роду

$$-\lambda \frac{\partial T_1(R_2, \tau)}{\partial r} + q_{2-1}(\tau) = 0, \quad (4)$$

де $T_0 = 293$ – початкова температура сталевій колони, K; $q(\tau) = q_{2-1}$ – інтенсивність теплового потоку, який сприймає сталева колона; r – товщина стінки сталевій колони, м; τ – час, с; R_2 – зовнішній радіус колони, м; $\lambda = 58 - 0,042(T_1 - 273)$ – коефіцієнт теплопровідності сталі, Вт/м·К.

Розв'язок рівняння (2) – (4) знайдено з використанням перетворень Лапласа

$$T_1(r, \tau) = \frac{q_{2-1} R_2}{\lambda} \left\{ \frac{R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \left[2Fo - \frac{1}{4} \left(1 - 2 \frac{R_2^2}{R_1^2} \right) - \frac{R_1^2}{R_2^2} \left(\ln \frac{r}{R_1} + \frac{R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \ln \frac{R_1}{R_2} + \frac{3}{4} \right) \right] + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\pi}{\mu_n} \frac{J_1 \left(\mu_n \frac{R_1}{R_2} \right) J_1(\mu_n)}{J_1^2 \left(\mu_n \frac{R_1}{R_2} \right) - J_1^2(\mu_n)} \left[J_0 \left(\mu_n \frac{r}{R_2} \right) Y_1 \left(\mu_n \frac{R_1}{R_2} \right) - Y_0 \left(\mu_n \frac{r}{R_2} \right) \times J_1 \left(\mu_n \frac{R_1}{R_2} \right) \right] \right\} e^{(-\mu_n^2 Fo)} + T_0 \quad (5)$$

де J_i, Y_i – функції Бесселя першого і другого роду порядку 0 і 1 відповідно; $Fo = a \cdot \tau / R_2^2$ – критерій Фур'є; $a = \lambda / \rho \cdot C_p$ – коефіцієнт температуропровідності, м²/с; $C_p = 0,47 + 2,1 \cdot 10^{-4}(T_1 - 273)$ – теплоємність сталі, Дж/кг·К; $\rho = 7800$ – густина сталі, кг/м³; R_1 – внутрішній радіус колони, м; μ_n – корені характеристичного рівняння (6)

$$J_1 \left(\mu \frac{R_1}{R_2} \right) Y_1(\mu) = Y_1 \left(\mu \frac{R_1}{R_2} \right) J_1(\mu), \quad (6)$$

За виразом (5) проведено розрахунок температурного розподілу по товщині стінки колони. Результати представлені графічно на рис. 4.

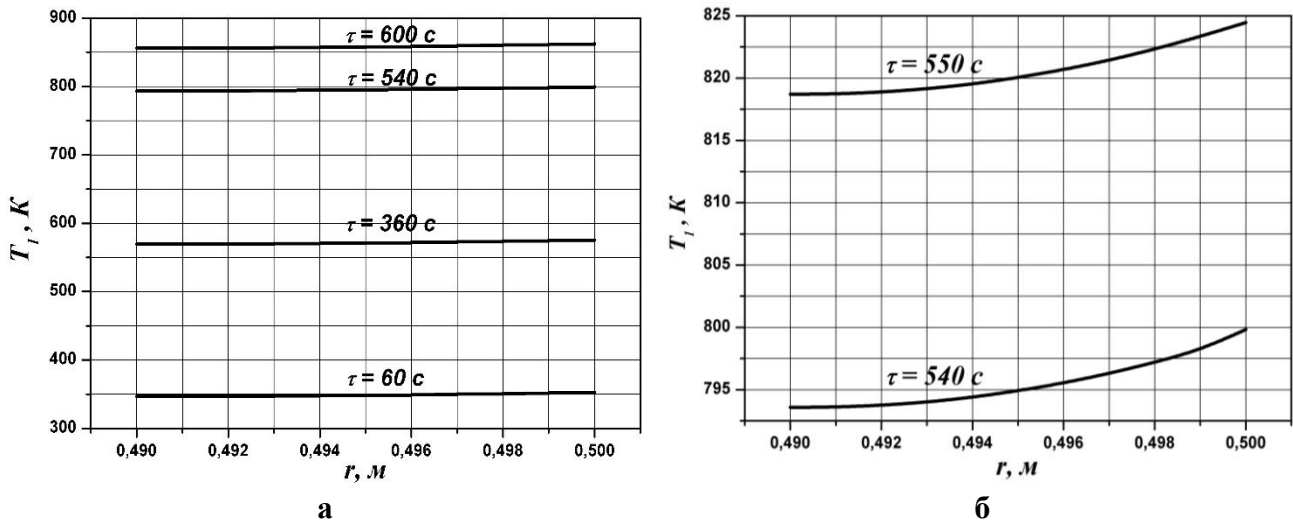


Рисунок 4 – а – температурний розподіл по ширині стінки сталевій колони в різні проміжки часу; б - температурний розподіл по ширині стінки сталевій колони на 9-й хвилині (540 с) та на момент прогрівання до критичної температури (550 с)

Як видно з формули (5), $T_1(r, \tau)$ залежить від інтенсивності теплового випромінювання, теплофізичних параметрів матеріалу (ρ, C_p, λ) та часу – τ , протягом якого теплове випромінювання діє на конструкцію. Для нашого випадку, знаючи критичну температуру матеріалу, з якого виготовлена колона – 550 °C (823 K), з рівняння (5) можна визначити час, за який колона нагріється до цієї температури. Результати обчислень представлені графічно на рис. 5.

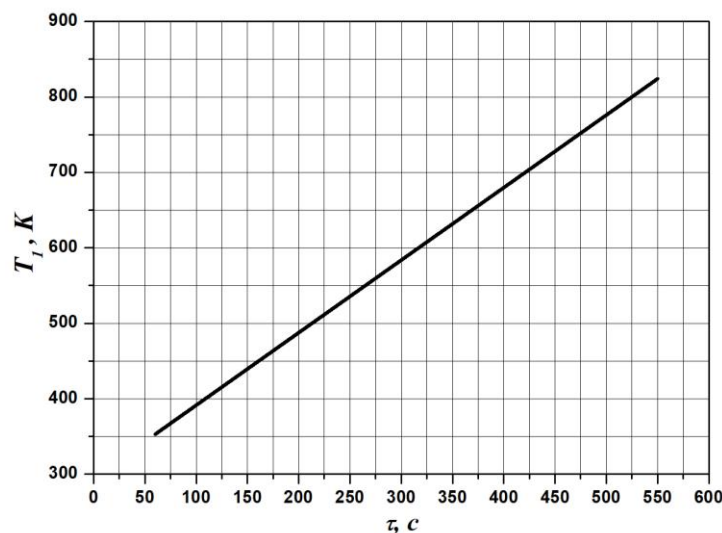


Рисунок 5 – Залежність температури на поверхні сталевій колони від часу

При розрахунках враховувалось максимальне значення інтенсивності теплового випромінювання, яке сприймає сталеві колона, що відповідає початковій стадії пожежі. З графіку видно, що колона прогріється до критичної температури – 550 °C (823 K) за 550 с.

Проте даний варіант розрахунку є неточним. Оскільки τ – час, протягом якого конкретне значення q_{2-1} діє на сталеву колону. Тобто максимальне значення $q_{2-1} = 42,4$ кВт/м² буде лише на початковій стадії пожежі при $\Delta T \approx 1000$. З плином часу температура колони постійно збільшуватиметься. Отже інтенсивність теплового випромінювання, яке вона

поглинатиме – постійно зменшуватиметься. Формула (5) враховує час, протягом якого діє *стаціонарний* (незмінний з плином часу) тепловий потік – $q_{2-1} = const$, що діє на колону.

Очевидно, що для покращення точності при розрахунках необхідно враховувати *не стаціонарний* (змінний з плином часу) тепловий потік – $q_{2-1}(\tau)$, що діє на поверхню колони. Проте як його врахувати у формулі (5)? Для вирішення цієї задачі пропонуємо наступний спосіб.

Визначивши інтенсивність теплового потоку, яку поглинає колона на початку пожежі ($42,3 \text{ кВт/м}^2$) припустимо, що протягом невеликого проміжку часу, скажімо $\Delta\tau = 10 \text{ с}$, на колону діяв стаціонарний тепловий потік. Розрахуємо як зміниться температурне поле колони за цей проміжок часу (рис. 6).

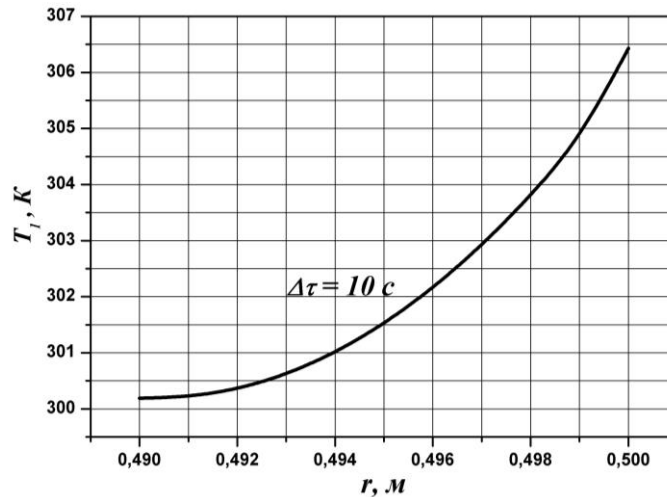


Рисунок 6 – Залежність температури на поверхні сталевих колон від часу

З рисунку 6 видно, що за 10 секунд температура на зовнішній поверхні колони піднялась до 306,4 K. Підставимо цей результат у формулу (1) і розрахуємо як зміниться інтенсивність теплового потоку. Інтенсивність теплового потоку зменшиться із $42,3 \text{ кВт/м}^2$ до $42,28 \text{ кВт/м}^2$. Цей результат підставимо у формулу (5) з тим самим часовим проміжком $\Delta\tau = 10 \text{ с}$. Таку операцію здійснюємо повторно, поки не отримаємо бажаний результат (поки колона не прогріється до температури $550 \text{ }^\circ\text{C}$ (823 K)). Підсумувавши кількість часових проміжків $\Delta\tau$ отримаємо час, за який колона прогріється до критичної температури. Результати обчислень представлені графічно на рис 7.

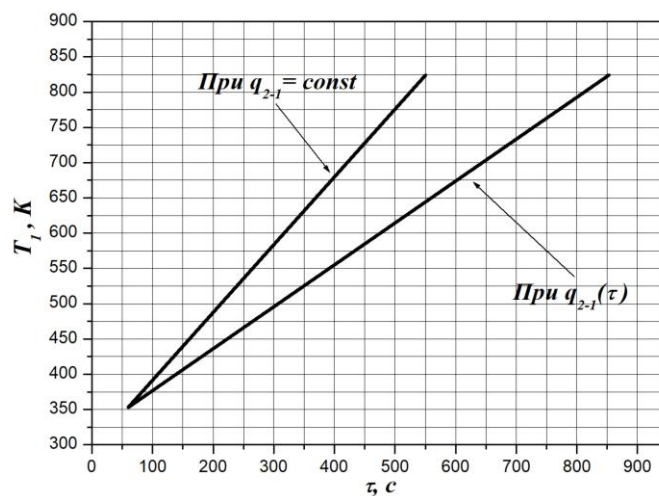


Рисунок 7 – Залежність температури на поверхні сталевих колон від часу

На рисунку 7 представлено залежність температури на поверхні сталеві колони від часу при стаціонарному та змінному з плином часу тепловим потоком. Як видно з графіку, при нестаціонарному тепловому потоці температура на поверхні сталеві колони досягне критичного значення за 853 с (14 хв 13 с), що в свою чергу на 5 хв 3 с довше, ніж при першому варіанті розрахунків, коли враховувався стаціонарний тепловий потік $q_{2-1} = const$. Слід зазначити, що точність розрахунків залежить від $\Delta\tau$. Чим менше значення $\Delta\tau$, тим точніший буде результат і навпаки. У нашому варіанті розрахунків ми зупинилися на значенні $\Delta\tau = 10$ с, оскільки дані обчислення мають виключно демонстративний характер і не потребують високої точності.

Запропонований спосіб розрахунку можна застосовувати і для інших задач теплообміну не обмежуючись заданими параметрами пожежі.

Висновки. В роботі запропоновано аналітичний метод розв'язання задач теплообміну, який дозволяє підвищити точність розрахунків.

В подальшому планується обґрунтувати точність даного методу розрахунків та порівняти результати обчислень із емпіричними даними.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Тацій Р. М., Пазен О. Ю., Шипот Л. С. Дослідження температурного поля в системі багат шарових циліндричних твердих тіл за умов пожежі. / Збірник наукових праць «Пожежна безпека», №37. – 2020. С.64-71.
2. Борисова А. С., Ніжник В. В., Середа Д. В. Експериментальні дослідження поверхневої густини теплового потоку в умовах вітрового впливу. Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека № 1(9). – 2020. С.107-115.
3. Зигель Р. Хауэлл Дж. Теплообмен излучением. – М.: Мир, 1975. – 936 с.
4. Нуянзін О. М., Поздєєв С. В, Сідней С. О., Некора О. В. Аналіз існуючих математичних моделей тепломасообміну у камерах вогневих печей установок для випробувань на вогнестійкість несучих стін. / «Пожежна безпека: теорія і практика» №18 – 2015. С.93-101.
5. Блох А. Г. и др. Теплообмен излучением: Справочник/ А. Г. Блох, Ю. А. Журавлев, Л. Н. Рыжков. – М.: Энергоатом-издат, 1991. – 432 с. ил.
6. Лыков А. В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 600с.

REFERENCES

1. Tacij R.M., Pazen O.Yu., Shypot L.S. Doslidzhennya temperaturnogo polya v systemi bagatosharovyh cylindrychnyh tverdyyh til za umov pozhezhi. / Fire safety: Collection of scientific works.LDU BGD. Lviv, No 37. – 2020. pp.64-71.
2. A. Borysova, V. Nizhnyk. Method of experimental research of the dependence of the critical surface density of the heat flow from the wind influence. / Scientific bulletin: Civil protection and fire safety. No 1(9). – 2020. Pp.107-115.
3. Zigel R., Hauell G. Radiative heat exchanging. Moskow: Mir, 1975. – 936 p.
4. . A. Nuyanzin, S. Pozdeyev, S. Sidney [and others], Fire safety: theory and practice: collection of scientific works, Cherkasy, 18, 91 (2015)
5. Bloh, A.G., Zhuravlev, Ju.A. and Rizhcov, L.N. (1991) Radiation Heat Transfer. Reference Book. Energoatomizdat, Moscow, 432 p.
6. Lykow A. V. Theory of thermal conductance. Moskow: Vysshaya Shkola, 1967. – 600 p.

*Mykhailo Semerak, Doctor of Technical Science, professor,
National University Lviv Polytechnic
Mykola Mykhailyshyn, Ivan Nesen,
Cherkasy Institute of Fire Safety named by heroes of Chernobyl
of National University of Civil Defense of Ukraine*

ANALYTICAL METHOD OF SOLVING CURRENT HEAT EXCHANGE PROBLEMS

In fire safety, the tasks to determine the heat exchange between different objects are relevant, for example, the calculation of the thermal impact of fire on the elements of buildings or structures. There are often problems in the scientific literature that determine the effect of a flame torch on various objects, such as the load-bearing walls of a building, the human body, pipelines, and so on. In most cases, the solution of these problems is to determine the time for which the object is heated to a critical temperature or to determine the maximum temperature to which the object can heat for a certain period of time. The article proposes an analytical method for solving heat transfer problems. The article simulates the fire of a 500 m³ vertical steel tank filled with fuel oil and calculates the thermal effect of the flame of a torch on a steel column located next to the tank at a distance of 5 m. According to the results of calculations, the graphical dependences of the heat flux intensity on the surface temperature of the steel column and the temperature difference between the surface of the column and the flame torch are derived. The results of heat flux intensity calculations are substituted into the differential equation of thermal conductivity and the temperature distribution over the column wall thickness is determined. At the same time, it is clearly demonstrated how to take into account the change in heat flux over time when calculating. As a result of calculations it is established that under the action of stationary heat flow the steel column warms up to critical temperature of 550 °C (823 K) for 550 s, and under the action of heat flux of alternating over time - for 853 s, which in turn is 5 minutes longer than under action stationary heat flow. Graphical dependences of the temperature on the surface of the steel column as a function of time are derived, which allow to compare the results of calculations at steady heat flux and variable with time.

Also in the article other methods of calculation of similar problems of heat exchange such as use of the software like "ANSYS CFX", "SOFIE", "FLOW-3D" etc. are considered. Their advantages and disadvantages are noted.

Key words: *heat transfer, heat flux, Stefan-Boltzmann equation, differential equation of thermal conductivity.*