

ТЕРМОДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ В ЗАМКНУТОМУ ПРОСТОРИ ВЕРТИКАЛЬНИХ СТАЛЕВИХ РЕЗЕРВУАРІВ ЗА УМОВ ПОЖЕЖІ

Розроблена методика визначення інтенсивності теплових потоків від нагрітої покрівлі і верхніх поясів РВС, що падають на поверхню нафтопродукту. Досліджено залежність їх величини від кутових коефіцієнтів випромінювання. Розроблено математичну модель для визначення нестационарного температурного поля по глибині шару нафтопродукту, який нагрівається. Запропоновано методику прогнозування орієнтовного часу викиду нафтопродуктів із РВС за умов пожежі.

Ключові слова: резервуарні парки, теплові потоки, нестационарне температурне поле, випаровування нафтопродуктів.

М.М. Семерак, В.В. Чернецький, Н.Р. Михайлишин

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЗАМКНУТОМ ПРОСТРАНСТВЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ В УСЛОВИЯХ ПОЖАРА

Разработана методика определения интенсивности тепловых потоков, от нагретой кровли и верхних поясов РВС, падающих на поверхность нефтепродукта. Исследована зависимость их величины от угловых коэффициентов излучения. Разработана математическая модель для определения нестационарного температурного поля по глубине слоя нефтепродукта, который нагревается. Предложена методика прогнозирования ориентировочного времени выброса нефтепродуктов из РВС в условиях пожара.

Ключевые слова: резервуарные парки, тепловые потоки, нестационарное температурное поле, испарения нефтепродуктов

М.М. Semerak, V.V. Chernetskyu, M.R. Mykhailyshyn

THERMODYNAMIC PROCESS IN ENCLOSED SPACE OF VERTICAL STEEL TANKS DURING FIRE

In this work the influence of heat flow on the oil that is stored in the tank are explored. The mathematical model for unsteady temperature field determining through-the-thickness of petroleum products that are being heated by fire is developed. The method for forecasting the approximate time of the release of oil from the tank is proposed.

Key words: tank farms, thermal flow, unsteady temperature field, boiling oil, oil evaporation.

Актуальність теми. Під час пожеж у резервуарних парках найбільшу небезпеку становлять вибухи резервуарів і викиди нафтопродуктів, оскільки внаслідок цих процесів пожежа швидко поширюється на великі площі, забирає людські життя і завдає значних матеріальних збитків. За даними наукових публікацій, в яких висвітлюються проблеми забезпечення пожежної безпеки резервуарних парків, траплялися випадки, коли руйнація резервуарів при вибуху супроводжувалася відривом корпусу від днища. Внаслідок цього резервуари злітали вгору на значну висоту. Траплялися випадки, коли при вибуху РВС-5000 корпус відлітав приблизно на 50 м, при вибуху РВС-700 – на 25 [1]. За свідченнями очевидців схожі випадки трапилися

при горінні нафтобази у Васильківському районі у 2015 р. У науковій літературі проблема руйнування резервуарів при вибуху з відривом днища від корпусу є недослідженою. Це ставить перед нами завдання дослідити причини відриву стінок резервуарів від днища та їх квазімиттєвого руйнування. З цією метою досліджено вплив теплових потоків пожежі на конструкції РВС [2,3]. В роботі досліджується вплив теплових потоків на температурне поле нафтопродуктів, які зберігаються в резервуарах.

Постановка задачі. Змодельємо пожежу в резервуарному парку. Внаслідок удару блискавки в РВС стався вибух, яким зірвало покрівлю РВС і нафтопродукт всередині загорівся. Теплові потоки від пожежі в резервуарі будуть впливати на резервуари, розташовані поруч. Стінки і покрівлі сусідніх резервуарів будуть нагріватися.

При розв'язанні цієї задачі було розглянуто дві схеми: **а)** теплове випромінювання від бічних стінок резервуара; **б)** теплове випромінювання від стаціонарної покрівлі резервуара (рис. 1)

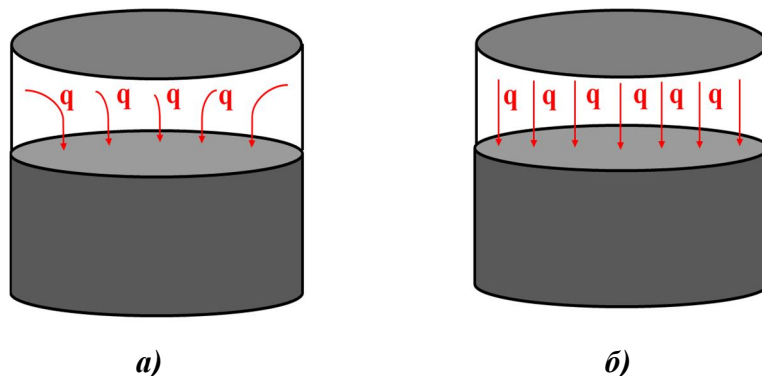


Рисунок 1 – Схематичне зображення теплових потоків, які діють на нафтопродукт в середині резервуара: **а)** від бокових стінок; **б)** від покрівлі

Тепловий потік, який сприйматиме дзеркало нафти, складається з двох складових: тепловий потік від випромінювання покрівлі резервуара і тепловий потік від випромінювання бічних стінок резервуара, які розташовані вище дзеркала нафти. Інтенсивність теплового потоку визначається за формулою

$$q = q_{\sigma} + q_n \quad (1)$$

де q_{σ} – інтенсивність теплового потоку, яку випромінює бічна стінка резервуара (рис. 1 **а**)), $\text{Вт}/\text{м}^2$;

q_n – інтенсивність теплового потоку, яку випромінює покрівля резервуара (рис. 1 **б**)), $\text{Вт}/\text{м}^2$ [4].

$$q_{\sigma,n} = \varepsilon_{\text{при}} \psi_{\sigma,n} \cdot 5,67 \left[\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \right], \quad (2)$$

де $\varepsilon_{\text{при}}$ – приведений ступінь чорноти стінок резервуарів; $\psi_{\sigma,n}$ – кутовий коефіцієнт випромінювання, T_2 – початкова температура нафтопродукту, K ; T_1 – температура стінки резервуара, K .

Для знаходження інтенсивності теплового потоку потрібно визначити кутовий коефіцієнт випромінювання для **схеми а)** [5]

$$\psi_{\sigma} = \frac{X^2 + 0,5}{\sqrt{X^2 - 1}} - X, \quad (3)$$

де $X = \frac{x}{2R}$; x – висота нагрітої стінки резервуара, м; R – радіус резервуара, м

і **схеми б)**

$$\psi_n = 0,5 \left(X - \sqrt{X^2 - 4 \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2} \right), \quad (4)$$

де $r_1 = \frac{R_1}{h}$; $r_2 = \frac{R_2}{h}$; $X = \frac{1+r_2^2}{r_1^2} + 1$; h – відстань від покрівлі до дзеркала нафтопродукту, м;

R_1, R_2 – радіуси покрівлі і дзеркала нафтопродукту відповідно (для цього випадку $R_1 = R_2$), м.

Використовуючи рівняння (3) і (4) знайдемо кутовий коефіцієнт для обох схем. Результати досліджень представлені графічно на рис. 2.

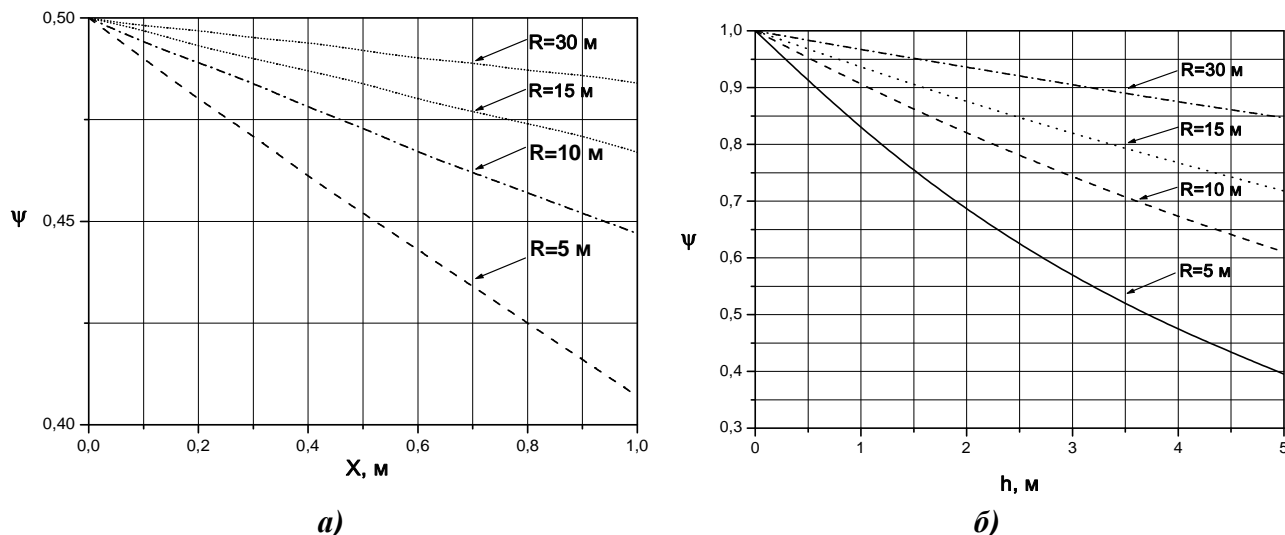


Рисунок 2 – Залежність кутового коефіцієнта випромінювання від величини X та h відповідно, для різних радіусів РВС

Використовуючи вираз (2) з врахуванням виразу (3) для **а)** і (4) для **б)**, досліджуємо зміну інтенсивності теплового потоку. При розрахунку приймалися такі вихідні данні: температура внутрішньої стінки резервуара, що нагрівається внаслідок зовнішньої пожежі $=823$ К, температура дзеркала нафтопродукту, що нагрівається від теплового потоку $=300$ К. Ступінь чорноти стінки резервуара $=0,76$, а дзеркала нафтопродукту $=0,95$. Результати досліджень зображені графічно на рис. 3.

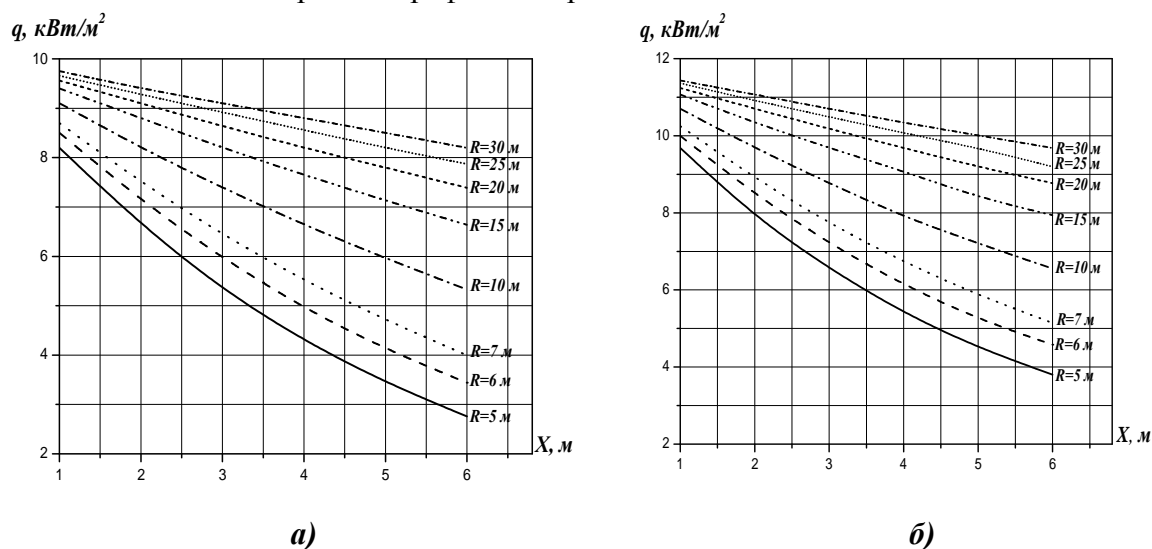


Рисунок 3 – Залежність інтенсивності теплового потоку: **а)** – від висоти нагрітої бічної стінки; **б)** – від відстані нагрітої покрівлі резервуара до дзеркала нафтопродукту, при фіксованих радіусах резервуарів

З метою більш точного розрахунку температурного поля ми врахували зміну теплофізичних характеристик нафтопродуктів, а саме:

густина нафтопродуктів визначається за формулою

$$\rho = \rho_{20} - \zeta_t (t - 20) \quad (4)$$

де ρ_{20} – густина нафти (нафтопродукту) при температурі 20°C , $\text{кг}/\text{м}^3$;

$\zeta_t = 1,825 - 0,001315\rho_{20}$ – температурна поправка;

теплоємність нафтопродуктів визначається за формулою Крєго

$$c = \frac{31,56}{\sqrt{\rho_{20}}} (762 + 3,39(t + 273,15)) \quad (5)$$

де c – теплоємність (нафтопродукту), $\text{Дж}/\text{кг} \cdot \text{K}$;

t – температура, $^\circ\text{C}$;

теплопровідність нафтопродуктів визначається за формулою Крєго-Сміта

$$\lambda = \frac{156,6}{\rho_{20}} (1 - 0,00047(t + 273,15)) \quad (6)$$

де λ – теплопровідність нафти (нафтопродукту), $\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{K}$;

t – температура, $^\circ\text{C}$

З метою дослідження процесу прогрівання нафти по глибині резервуара, розв'яжемо нестационарне рівняння теплопровідності

$$\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2} \right) \quad (7)$$

з початковою умовою

$$t(x, 0) = t_0 \quad (8)$$

та граничною умовою другого роду

$$\lambda \frac{\partial t(0, \tau)}{\partial x} + q(t) = 0, \quad (9)$$

де t_0 – початкова температура нафтопродукту, $^\circ\text{C}$;

x – рівень наповнення резервуара.

Розв'язок рівняння (7) – (9) знаходимо з використанням перетворень Лапласа [6]

$$t(x, \tau) = \frac{2q}{\lambda} \sqrt{a\tau} \left[\frac{1}{\pi} \exp\left(-\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}}\right)^2\right) - \frac{x}{2\sqrt{a\tau}} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}}\right) \right] \quad (10)$$

$a = \frac{c_p}{\rho}$ – коефіцієнт температуропровідності, $\text{м}^2/\text{с}$;

c_p – теплоємність, $\text{Дж}/\text{кг} \cdot \text{K}$;

ρ – коефіцієнт теплопровідності, $\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{K}$;

За формулою (10) розрахуємо зміни температурного поля по глибині шару нафти з плином часу. У розрахунку прийнято, що $t_0 = 20^\circ\text{C}$, $\rho_0 = 840 \text{ кг}/\text{м}^3$, $q = q_b + q_n$,

$q_b = 4 \text{ кВт}/\text{м}^2$, $q_n = 6 \text{ кВт}/\text{м}^2$. Для математичного дослідження використаємо декартову систему координат. Початок вісі x розмістимо на поверхні нафтопродукту, вона відображатиме температурну шкалу. Вісь y відображатиме глибину шару нафтопродукту, її спрямуємо вниз (рис. 4).

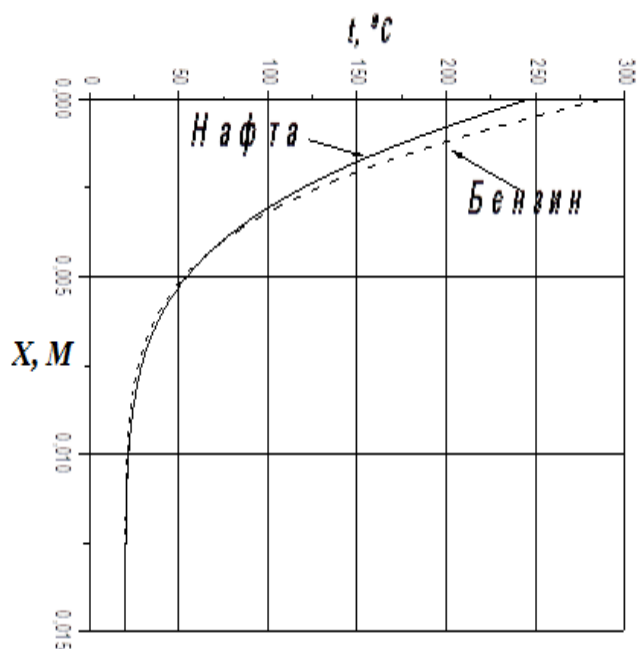


Рисунок 4 – Температурне поле нафти і бензину по глибині її шару за час 100 с

Аналіз графічної залежності, показує що за 100 секунд приповерхневий шар нафти прогрівається до температури 70...245 $^{\circ}\text{C}$, а бензину – до 50...285 $^{\circ}\text{C}$. Отже середня температура нафти і бензину в шарі товщиною 4 мм становить 100 $^{\circ}\text{C}$ і 120 $^{\circ}\text{C}$ відповідно (рис. 5).

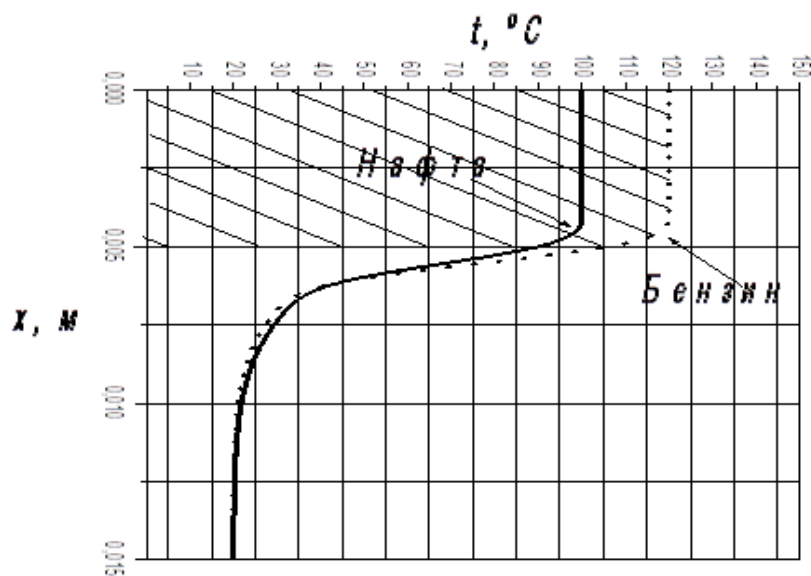


Рисунок 5 – Відображення середньої температури нафтопродуктів по глибині шару за час 100 с

Оскільки температура кипіння нафтопродуктів становить 80...130 $^{\circ}\text{C}$, можна зробити висновок, що шар нафтопродуктів, який заштрихований, за час теплового впливу 100 секунд закипає. Шар нафти товщиною 4 мм має масу 305 кг, а бензину – 255 кг. Щоб знайти кількість тепла, необхідного для того, щоб випарувати киплячий нафтопродукт, використаємо залежність [7]

$$r = 993,5 - 661,5\rho_0 - \frac{(t_k + 273,15)}{M}(1,733 - 1,813\rho_0) - \left(\frac{(t_k + 273,15)}{M}\right)^2(0,00059\rho_0 - 0,00015), \quad (11)$$

де t_k – температура кипіння нафтопродукту, $^{\circ}\text{C}$;

M – молярна маса нафтопродукту, $\frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$;

ρ_0 – густина нафтопродукту при температурі 20°C , $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

З рівняння (11) обчислимо, що теплота випаровування для бензину дорівнює 290-300 кДж/кг, а для нафти – 250-350 кДж/кг. Отже для випаровування 305 кг нафти необхідно 91 500 кДж тепла, а для випаровування 255 кг бензину – 75 225 кДж. Враховуючи інтенсивність теплового випромінювання визначимо час, за який нафтопродукт випарується: для нафти він становить 110 с, а для бензину – 90с. Використовуючи ці данні можна записати лінійну залежність часу випаровування нафтопродуктів із закритого резервуара, на який діє зовнішня пожежа, від товщини їхнього шару (рис. 6).

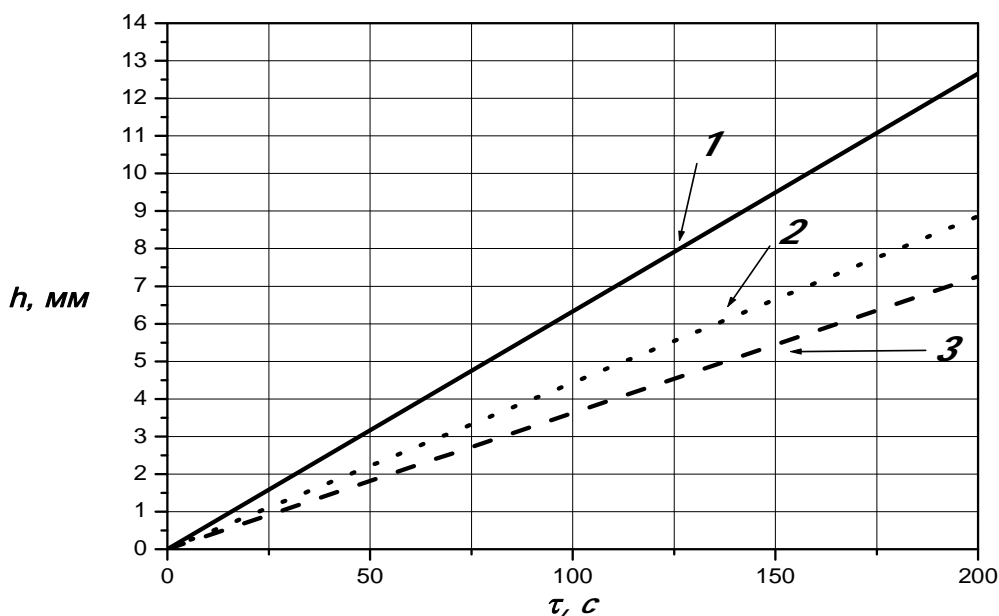


Рисунок 6 – Залежність товщини шару випаровування (h) нафтопродуктів від часу (τ)

На рисунку пряма 1 описує швидкість вигорання нафтопродуктів із резервуару, за умови полум'яного горіння на поверхні дзеркала нафтопродукту [8]; пряма 2 – швидкість випаровування бензину; пряма 3 – швидкість випаровування нафти.

Аналізуючи рисунок можна зробити висновок, що швидкість вигорання нафтопродуктів, за умови полум'яного горіння всередині резервуара, є більшою ніж швидкість випаровування нафтопродуктів, за умови нагрівання горючої рідини від теплового потоку випромінювання від нагрітих стінок резервуара.

Висновок. Розроблена методика розрахунку швидкості випаровування нафтопродуктів які зберігаються в середині вертикальних сталевих резервуарів з стаціонарною покрівлею. Використовуючи цю методику можна визначити час початку закипання придонної води, яка наявна у резервуарах. Оскільки при закипанні придонної води відбувається викид, то за допомогою запропонованої методики можна спрогнозувати орієнтовний час викиду нафтопродуктів.

Список літератури:

1. Волков О.М. Пожарная безопасность резервуаров с нефтепродуктами. М.: Недра, 1984. – 151 с.
2. Семерак М.М., Чернецький В.В., Михайлишин М.Р. Математичне моделювання та дослідження теплових процесів у вертикальних коаксіальних резервуарах за умов пожежі. / Збірник наукових праць «Пожежна безпека», №26. – 2015. С.133-137.
3. Чернецький В.В., Семерак М.М., Михайлишин М.Р. Математичне моделювання та дослідження теплових процесів у вертикальних сталевих резервуарах за умов пожежі. / Збірник наукових праць «Пожежна безпека», №27. – 2015. С.151-156.
4. Романенко П.Н. Теплопередача в пожарном деле. / Романенко П.Н., Бубыр Н.Ф., Башкирцев М.П./ М.: ВШ МВД СССР, 1969. – 425с.
5. Зигель Р. Хауэлл Дж. Теплообмен излучением. – М.: Мир, 1975. – 936с.
6. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.
7. Технология переработки нефти. В 2-ух частях. Часть первая. Первичная переработка нефти / Под ред. О.Ф. Глаголевой и В.М. Капустина. – М.: Химия, Колос 2006. – 400 с. ил.

References:

1. Volkov O.M. Pozharnaya bezopasnost' rezervuarov s nefteproduktamy. M.: Nedra, 1984. – 151 P.
2. Semerak M.M., Chernets'kyy V.V., Mykhailyshyn M.R. Matematychnе modelyuvannya ta doslidzhennya teplovykh protsesiv u vertykal'nykh koaksial'nykh rezervuarakh za umov pozhezhi. / Zbirnyk naukovykh prats' «Pozhezhna bezpeka», №26. – 2015. P.133-137.
3. Chernets'kyy V.V., Semerak M.M., Mykhaylyshyn M.R. Matematychnе modelyuvannya ta doslidzhennya teplovykh protsesiv u vertykal'nykh stalevykh rezervuarakh za umov pozhezhi.. / Zbirnyk naukovykh prats' «Pozhezhna bezpeka», №27. – 2015. P.151-156.
4. Romanenko P.N. Teploperedacha v pozharnom dele. / Romanenko P.N., Bubyр N.F., Bashkyrtsev M.P./ M.: VSH MVD SSSR, 1969. – 425p.
5. Zyhel' R. Khauell Dzh. Teploobmen yzluchenyem. – M.: Myr, 1975. – 936s.
6. Lykov A.V. Teoryya teploprovodnomy. – M.: Vysshaya shkola, 1967. – 600 p.
7. Tekhnolohyya pererabotky nefty. V 2-okh chastyakh. Chast' pervaya. Pervychnaya pererabotka nefty / Pod red. O.F. Hlaholevoy y V.M. Kapustyna. – M.: Khymyya, Kolos 2006. – 400 p. yl.
8. Blynov, V.Y., Khudyakov H.N. Dyffuzyonnoe horenye zhydkostey. M., Yzd-vo Akad. nauk SSSR, 1961. – 208 p.

