

УДК 614.841; 621.838.4

Ю.М. Сенчихін, к.т.н., доцент, НУЦЗУ,
Ю.Ю. Дендаренко, к.т.н., доцент, зав. каф., АПБ ім. Героїв Чорнобиля,
В.В. Сировий, к.т.н., професор, НУЦЗУ

**МОДЕЛЮВАННЯ ВЗАЄМОДІЇ ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМИ
«ПАЛАЮЧИЙ РЕЗЕРВУАР – РАДІАЛЬНИЙ ВОДЯНИЙ
СТРУМІНЬ (ТЕПЛОВИЙ ЕКРАН) – СУСІДНИЙ РЕЗЕРВУАР»**
(представлено д-ром техн. наук Куценко Л.М.)

Розроблено математичну та фізичну моделі взаємодії елементів системи «палаючий резервуар – радіальний водяний струмінь – сусідній резервуар», що дозволяє визначити ефективність роботи водяної завіси з використанням насадки радіального струменя.

Ключові слова: радіальний струмінь, теплове випромінювання, резервуар з ЛЗР або ГР, водяна завіса, температура стінки резервуара.

Постановка проблеми. В практичній діяльності підрозділів пожежної охорони важливо вміти обчислювати основні характеристики системи «палаючий резервуар – радіальний водяний струмінь – сусідній резервуар» в цілому, зокрема – визначити, наскільки ефективною буде робота водяної завіси.

Аналіз останніх досягнень та публікацій. Результати експериментів в полігонних умовах підтверджують, що насадки розпиленіх струменів (НРС) є ефективними пристроями для створення водяних завіс і можуть бути задіяні при захисті сусідніх РВС від теплового випромінювання палаючих. Температура в зоні теплової дії знижується з 300-350°C до 20-25°C, що виявляється безпечним за умовами експлуатації РВС, що заповнені ЛЗР або ГР. При цьому, отримані моделі нагрівання ємності з нафтопродуктом під впливом випромінювання дають можливість оцінити температуру матеріалу стінки резервуара в кожний момент часу, за умови, що задано значення густини теплового випромінювання [1-3].

Постановка задачі та її розв'язання. На підставі результатів лабораторних і полігонних випробувань НРС, враховуючи початкові температурні умови, що доводить майже повну екранно-поглинаючу здатність радіального водяного струменя, потрібно вирішити задачу ефективності роботи водяної завіси.

Розглянемо випромінювання точкового джерела та його вплив на матеріал резервуара з ЛЗР або ГР (рис. 1) (нижче буде встановлено зв'язок між впливом реальної пожежі та модельним випадком точкового джерела).

Основна мета створення водяної завіси – захистити від впливу

теплового випромінювання об'єкт, що захищається. При цьому густина потоку енергії випромінювання $q(X, Y, Z, t)$ є досить складною функцією координат X, Y, Z та часу t , однак в нашому випадку, коли розглядається точкове джерело, поле q є сферично симетричним:

$$q = \frac{Q}{4\pi\{(X - X_c)^2 + (Y - Y_c)^2 + (Z - Z_c)^2\}} \quad (1)$$

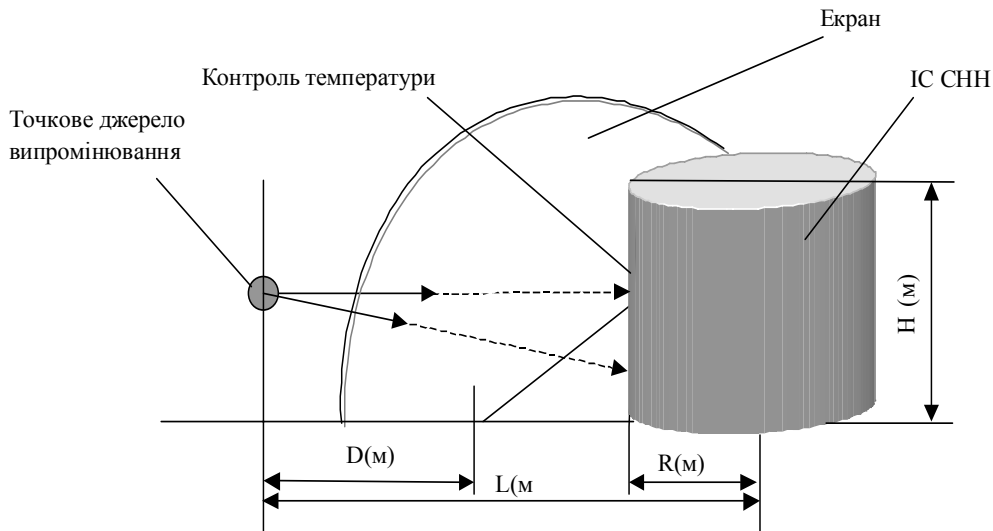


Рис. 1 – Вплив точкового джерела випромінювання на інженерну споруду (ІС) складів нафти та нафтопродуктів (СНН)

У даному випадку Q – частина теплового ефекту пожежі, яка йде на випромінювання; в практичних обчисленнях можна прийняти $Q = 0,4Q_0$, де Q_0 – загальний енергетичний ефект пожежі, Вт.

Під час розроблення математичної моделі системи будемо використовувати принцип ННВ [4] – найбільш небезпечний варіант розвитку подій (принцип «оцінки зверху»).

Виконаємо «оцінку зверху» значення густини потоку енергії випромінювання на поверхні резервуару з ЛЗР (ГР) з урахуванням впливу ослаблення випромінювання під час перетинання водяної завіси:

$$q_{\max} = \frac{Q}{4\pi(D - R)^2} \gamma, \quad (2)$$

де γ – коефіцієнт ослаблення впливу випромінювання [5].

Далі, також виходячи з принципу ННВ, будемо вважати, що бокова поверхня ємності знаходиться під впливом випромінювання q_{\max} , випромінювання падає по нормалі до поверхні та повністю поглинається. Температура тонкої стінки визначається співвідношенням

$$\frac{C\Delta}{\rho} \frac{dT}{dt} = -\varepsilon\sigma T^4 + q_{\max}, \quad (3)$$

де C – питома теплоємність металу, з якого виготовлена ємність, Дж/кг; Δ – товщина стінки, м; ρ – густина металу (кг/м³); ε – коефіцієнт чорноти поверхні; σ – стала Больцмана.

Коефіцієнт ослаблення випромінювання визначається емпіричною моделлю [6, 5], причому емпіричні співвідношення зв'язують коефіцієнт ослаблення випромінювання γ з секундною витратою води G , що необхідна для створення одного квадратного метра водяної завіси:

$$G = \frac{1}{\tau} \left\{ \frac{2}{3} r_0 \rho_v 2,303 \lg \gamma \right\} = \frac{1}{\tau} \{0,67 r_0 \ln \gamma\}, \quad (4)$$

де r_0 – радіус частинки води ($r_0 = 7 \cdot 10^{-10}$ м. [58]); ρ_v – питома густина води, кг/м³; $\tau \approx 0,5$ с – час перебування крапель у водяній завісі [7]. Загальна витрата води дорівнює

$$G_0 = S \frac{1}{\tau} \{0,67 r_0 \ln \gamma\}, \quad (5)$$

де S – площа, яку необхідно захистити, м². Звідси

$$\gamma = \frac{Q}{4\pi(L-R)^2 q_{\max}} = \exp \left\{ \frac{G_0 \tau}{0,67 r_0 S} \right\} \Rightarrow q_{\max} = \frac{Q}{4\pi(L-R)^2} \exp \left\{ -\frac{G_0 \tau}{0,67 r_0 S} \right\}. \quad (6)$$

Рівняння (5), доповнене співвідношенням (6) та початковою $T(0) = T_0$ (T_0 – температура навколишнього середовища) є звичайним диференціальним рівнянням першого порядку, яке можна розв'язати аналітично методом послідовних наближень. Перепишемо (3) у вигляді

$$\frac{dT}{dt} = \delta T^4 + B. \quad (7)$$

Розв'язання рівнянь (6), (7) можна також виконати в квадратурах [8], однак результати в загальному випадку не дають можливості отримати аналітичну залежність температури на поверхні ємності від часу, тому скористаємося тією обставиною, що рівняння (7) містить малий параметр – величину $\delta = \frac{\varepsilon\sigma\rho}{C\Delta}$, тому природно виконати розкладення по малому параметру δ [8]. Будемо шукати розв'язання у вигляді

$$T(t) = T_0(t) + \delta T_1(t) + \delta^2 T_2(t) + \dots \quad (8)$$

У першому наближенні

$$\frac{dT_0}{dt} = B; \quad \frac{dT_1}{dt} = \delta T_0^4. \quad (9)$$

Звідси з урахуванням початкових умов

$$T(t) = T_n + Bt + \frac{\delta}{5B} \left\{ (T_n + Bt)^5 - T_n^5 \right\}. \quad (10)$$

Перепишемо співвідношення (10) з урахуванням (1) – (4):

$$T(t) = T_n + \frac{q_{max} \rho}{C\Delta} t + \frac{\sigma \varepsilon}{5} \frac{4\pi(L-R)^2}{Q} \exp\left\{ \frac{G_0 \tau}{0,67 r_0 S} \right\} \times \left\{ \left(T_n + \frac{Q}{4\pi(L-R)^2} \exp\left\{ -\frac{G_0 \tau}{0,67 r_0 S} \right\} t \right)^5 - T_n^5 \right\} \quad (11)$$

Формула (11) дає можливість «оцінити зверху» значення температури стінки ємності в кожний момент часу, і, відповідно, – можливий момент загоряння нафтопродукту в ємності. Площу водяної зависи S можна оцінити як

$$S = 4RH [1]. \quad (12)$$

Тепер аналітична формула (11) дає однозначну залежність максимальної температури на поверхні ємності від часу.

Для того, щоб використати на практиці формулу (11) необхідно знати теплову витрату реальної пожежі. В нашому випадку відбувається горіння рідини в ємності, тому загальна енергетична витрата пожежі незначною мірою залежить від часу [9] (швидкість вигорання $v_f = \text{const}$), тому

$$Q = \frac{\pi D^2}{4} H_c v_f, \quad (13)$$

де H_c – питома теплота згоряння рідини, Дж/кг; v_f – швидкість вигорання рідини, см/год.

На рис. 2 наведені в графічній формі результати обчислення температури стінки ємності для випробувань в полігонних умовах. Експериментально отримані значення відповідають температурі ємності на висоті 0,5 Н від поверхні землі (рис. 1).

Отримані дані порівняння результатів випробувань та теорети-

чних обчислень мають досить щільну збіжність на якісному рівні; крім того, важливою є та обставина, що температура, отримана в результаті теоретичного обчислення, перевищує експериментально отримані дані, тому можна стверджувати, що застосування розробленої моделі в практичній роботі підрозділів пожежної охорони дає можливість оцінити ефективність роботи водяної завіси „зверху”. Відповідно, під час реальної пожежі не відбудеться загоряння резервуара раніше, ніж передбачено обчисленням.

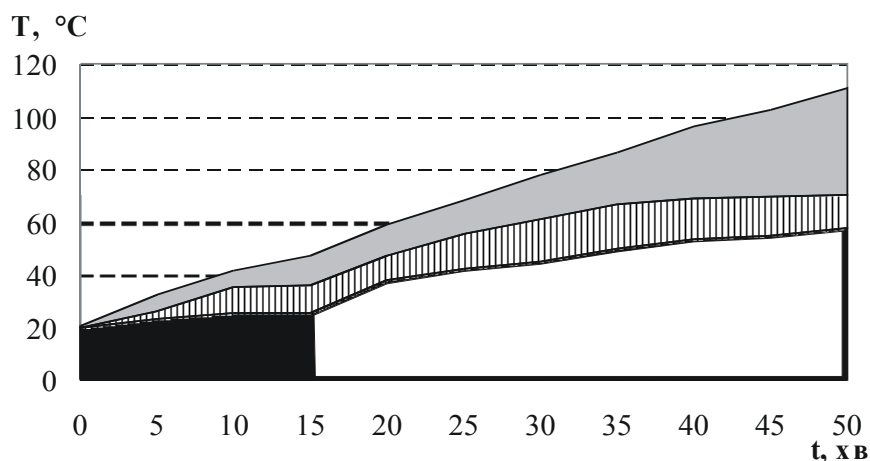


Рис. 2 – Температура на поверхні стінки резервуара під час пожежі: – обчислення “0”; – обчислення “1”; – експеримент

Проаналізуємо наведене вище ствердження з точки зору структури рівнянь, що описують процес. $\forall t: T_0(t) > T_1(t) > T_e(t)$, що цілком природно, тому що „нульове наближення” відповідає ситуації, коли не враховується випромінювання ємності з ЛЗР, відповідно її обчислена температура буде вищою; „перше наближення”, коли враховується випромінювання ємності, передбачає більші, ніж під час реальної пожежі, значення густини потоку енергії випромінювання, яке падає на стінку ємності. Отже обчислена температура буде меншою, ніж у „нульовому наближенні”, але більшою, ніж температура, отримана в результаті експериментів.

На рис. 3 зображено отримана під час експерименту в полігонних умовах залежність зміни температури в зоні теплової дії до водяної завіси (радіального водяного струменя) і за нею в часі. Показані графіки дають можливість оцінити ефективність захисту сусідніх РВС від впливу НФП за допомогою радіального водяного струменя.

Висновки. Результати лабораторних і полігонних випробувань НРС мають достатню подібність з теоретичними розрахунками і продемонстрували ефект зниження температури в зоні теплового впливу до і після радіального водяного струменя з 468°C до 21°C при лабораторних випробуваннях і з 350°C до 20-25°C при полігонних, що,

враховуючи початкові температурні умови, доводить майже повну екранно-поглинаючу здатність радіального водяного струменя.

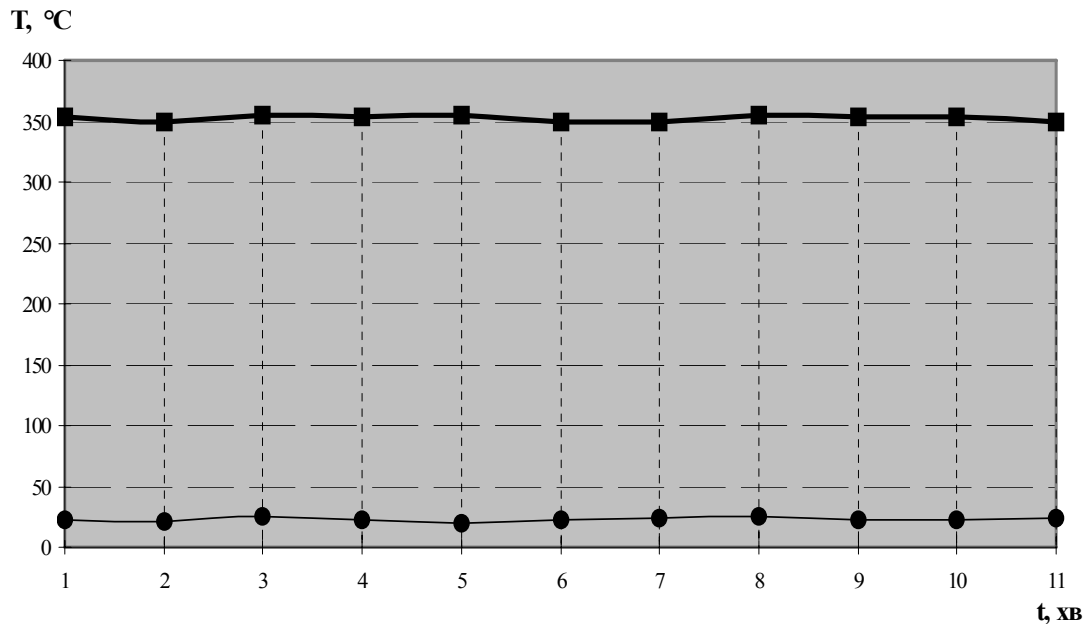


Рис. 3 – Залежність зміни температури в зоні теплової дії до і за радіальним водяним струменем у часі: **■** температура до радіального водяного струменя, °C; **●** температура за радіальним водяним струменем, °C

Розроблено математичну та фізичну моделі взаємодії елементів системи „палаючий резервуар – радіальний водяний струмінь – сусідній резервуар”. Результати обчислень характеристик ефективності роботи радіального водяного струменя близькі до експериментально отриманих даних.

ЛІТЕРАТУРА

1. Дендаренко Ю.Ю., Виноградов А.Г., Дядченко О.І., Шеренков І.А. Новий підхід до охолодження резервуарів з нафтою і нафтопродуктами під час пожеж: Матеріали наук.-практ. конф. // Науковий збірник. – Черкаси: ЧПБ, 2001. – С. 134-139.

2. Сенчихин Ю.Н., Дендаренко Ю.Ю. Насадок для создания радиальных водяных струй, снижающих воздействие теплового потока // Материалы II Междунар. науч.-практ. конф. „Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация”, – Мн.: Изд. центр БГУ, 2003. – С. 327-329.

3. Голендер В.А., Сенчихин Ю.М., Сировой В.В., Дендаренко Ю.Ю. Про сучасний підхід до рішення задач пожежної тактики: Науковий збірник. – Вип. 1. – Кн. 1. – Черкаси: ЧПБ, 1998. – С. 57-60.

4. Волков О.В., Проскураков Г.А. Пожарная безопасность на

предприятиях транспорта и хранения нефти и нефтепродуктов. – М.: Недра, 1981. – 256 с.

5. Зарубин В.С. Инженерные методы решения задач теплопроводности. – М.: Энергоатомиздат, 1983- 85 с.

6. Беляев Н.М., Рядно А.А. Методы теории теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1982.- 132 с.

7. Исследование процессов водопенного тушения пожаров / М.И. Четвертаков, И.Ф. Безродный, А.Н. Корневский, С.Н. Артюнов. – М.: Наука, 1987. – 252 с.

8. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1966.- 148 с.

9. Абдурагимов И.М., Говоров В.Ю., Макаров В.Е. Физико-химические основы развития и тушения пожаров. – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1980. – 255 с.

nuczu.edu.ua

Ю.Н. Сенчихин, Ю.Ю. Дендаренко, В.В. Сировой

Моделирование взаимодействия элементов системы «горящий резервуар – радиальная водяная струя (тепловой экран) – соседний резервуар»

Разработана математическая и физическая модели взаимодействия элементов системы «горящий резервуар – радиальная водяная струя – соседний резервуар», что позволяет определить эффективность работы водяной завесы с использованием насадки радиальной струи.

Ключевые слова: радиальная струя, тепловое излучение, резервуар с ЛВЖ или ГЖ, водяная завеса, температура стенки резервуара.

Y.N. Senchykhin, Y.Y. Dendarenko, V.V. Sirovoy

Design of co-operation of elements of the system a «conflagrant reservoir is a radial waterjet (afterheater) – nearby reservoir»

Developed mathematical and physical models of vza^omodeystviya elementov sistemi a «conflagrant reservoir is a radial waterjet is a nearby reservoir», that allows to define efektivnost' raboti of aquatic curtain with the use of attachment of radial stream.

Keywords: radial stream, caloradiance, reservoir with a flammable or combustible liquid, aquatic curtain, temperature of wall of reservoir.