

УДК 519.6

О. Є. Басманов¹, д.т.н., професор, пров. н.с. відділу (ORCID 0000-0002-6434-6575)

В. В. Олійник¹, к.т.н., доцент, нач. каф. (ORCID 0000-0002-5193-1775)

Є. В. Мориц², д.т.н., завідувач відділу експертизи (ORCID 0000-0003-0131-2332)

Я. Ю. Кальченко¹, PhD, доц. каф. (ORCID 0000-0002-3482-0782)

¹Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна

²Державний НДІ технологій кібербезпеки та захисту інформації, Київ, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ МІНІМАЛЬНОГО НАПОРУ ВОДИ ПРИ ЇЇ ПОДАЧІ НА ОХОЛОДЖЕННЯ РЕЗЕРВУАРА

Побудовано модель руху водного струменя після виходу з пожежного ствола. Модель спирається на систему лінійного однорідного і лінійного неоднорідного диференціальних рівнянь 2-го порядку з початковими умовами, що описують рух елементарного об'єму води в полі сили тяжіння і враховують опір повітря. Їх розв'язання разом з початковими умовами дає траєкторію руху водного струменя в залежності від горизонтальної і вертикальної складових початкової швидкості струменя. Побудовано залежність напору води від горизонтальної складової швидкості водного струменя на виході з пожежного ствола за умови досягнення струменем заданої точки на стінці резервуара. Показано, що така залежність є опуклою донизу функцією з єдиною точкою мінімуму. Мінімальному напору води відповідає лише одна траєкторія руху струменя, яка досягає заданої точки. Збільшення напору призводить до появи двох можливих траєкторій, одна з яких навісна, а інша може бути як навісною, так і настильною. Показано, що умовою настильності траєкторії є перевищення горизонтальною складовою швидкості певного граничного значення, яке пропорційне відстані до резервуара. Побудовано алгоритм визначення мінімального напору води при подачі в задану точку на стінці резервуара по настильній траєкторії. Алгоритм використовує метод Ньютона для чисельного розв'язання задачі умовної оптимізації. Показано, що для відстані до резервуара (5÷30) м напір води має становити (23÷58) м для резервуарів висотою 12 м і (37÷70) м для резервуарів висотою 18 м. Отримані результати можуть бути використані для визначення місць розташування пожежних стволів для подачі води на охолодження резервуарів при розробці плану локалізації та ліквідації пожежі в резервуарному парку, а також для зменшення витрат води внаслідок розбризкування після удару струменя об стінку резервуара.

Ключові слова: пожежний ствол, подача води на охолодження, траєкторія водного струменя, настильна траєкторія

1. Вступ

Пожежі на складах нафти і нафтопродуктів є одними із найнебезпечніших внаслідок «ефекту доміно», коли одна аварійна подія створює передумови для виникнення наступної [1]. Причиною цього є висока концентрація легкозаймистих і горючих рідин на невеликій площі, що обумовлено технологічними і економічними чинниками. Пожежа нафтопродукту в резервуарі або в розливі призводить до інтенсивного теплового впливу на сусідні технологічні об'єкти і, зокрема, на інші резервуари. Нагріваючись, сталеві конструкції сусідніх резервуарів можуть досягти температури самозаймання парів нафтопродукту, який в них зберігається. Це може призвести як до вибуху (якщо концентрація парів у газовому просторі резервуара знаходиться між нижньою і верхньою концентраційними межами розповсюдження полум'я), так і до виникнення горіння на дихальних пристроях резервуарів (якщо концентрація парів в газовому просторі резервуара перевищує верхню концентраційну межу розповсюдження полум'я).

В [2] досліджено 1144 аварії, які мали місце в резервуарних парках з нафтою і нафтопродуктами. Серед них виділено 100 аварій, для яких мав місце ефект доміно. Згідно з [3] близько 44 % масштабних пожеж, в яких спостерігався ефект доміно, починалися саме з пожежі в резервуарі або з пожежі розливу. Аналогічний результат наведено і в [4]: пожежі були причиною близько 43 % від загальної Fire Safety. DOI: 10.52363/2524-0226-2025-41-10

кількості аварій, в яких мав місце ефект доміно. При цьому найбільш поширеним сценарієм є пожежа в резервуарі або розливу нафтопродукту. Ще одним негативним наслідком масштабних пожеж є викид небезпечних речовин в атмосферу [5].

Незважаючи на заходи безпеки, що здійснюються, надзвичайні ситуації, пов'язані з розтіканням і горінням рідин на підприємствах і транспорті, все одно траплялися. З початком повномасштабного російського вторгнення в Україну нафтопереробні заводи, склади зберігання нафти і нафтопродуктів стали однією з цілей при ударах по критичній інфраструктурі [6].

Таким чином, актуальною проблемою є розповсюдження пожежі на сусідні резервуари внаслідок теплового впливу на них.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Стосовно об'єктів зберігання, переробляння або транспортування легкозаймистих та горючих рідин реагування на надзвичайні ситуації означає, по-перше, охолодження резервуарів, що горять, та сусідніх з пожежею, а, по-друге, підготовку і проведення пінної атаки для ліквідації пожежі [7]. Але при цьому рекомендовані інтенсивності подачі води на охолодження резервуарів, що горять, та сусідніх з ними не враховують виду нафтопродукту, що горить, напряму і швидкості вітру, що впливає на щільність теплового потоку від пожежі. В [8] розглянуто охолодження водними струменями резервуара, що нагрівається під тепловим впливом пожежі в сусідньому резервуарі. Модель враховує променевий і конвекційний теплообмін резервуара з пожежею і навколишнім середовищем, а також конвекційний теплообмін з водною плівкою, що стікає по стінці резервуара. Але побудована модель охолоджувальної дії водної плівки на стінку резервуара описує лише усталений розподіл температури по стінці резервуара. Поза увагою залишається питання, за яких умов можливий вихід на такий режим. В [9] побудовано модель охолодження стінки резервуара водною плівкою, що спирається на рівняння балансу тепла і маси для водної плівки і враховує википання води. Така плівка може бути утворена як стаціонарними кільцями охолодження на резервуарі, так і шляхом подачі води на стінку резервуара пожежними стволами. Запропонований підхід дає можливість визначити розподіл температури по поверхні резервуара при заданій об'ємній інтенсивності подачі води. Але обернена задача, тобто вибір такої інтенсивності подачі води, що забезпечує охолодження поверхні резервуара до безпечних значень температури, в роботі не розглянута. В [10] відзначено, що немає загальноприйнятих залежностей для визначення наслідків теплового впливу пожежі на резервуар з нафтопродуктом. Це, в свою чергу, ускладнює побудову моделей охолодження резервуарів водою, оскільки мають бути враховані такі параметри, як швидкість вітру, відстань і тип рідини, що горить. З метою зменшення витрат води доцільно використовувати її нерівномірну подачу в залежності від щільності теплового потоку, що припадає на дану ділянку стінки резервуара. Дослідження проведено із використанням пакета моделювання FDS (Fire Dynamics Simulator), що ускладнює узагальнення отриманих результатів та їх використання в умовах, відмінних від даних. В [11] поставлено і розв'язано задачу оптимального вибору інтенсивності подачі води на охолодження резервуара. Її особливістю є нерівномірність подачі води вздовж периметра резервуара. Інтенсивність подачі визначається із умови неперевищення температурою стінки резервуара заданого граничного значення. Але спосіб подачі води залишено поза увагою: одну й ту саму інтенсивність подачі води можна забезпечити як зміною напору, так і зміною діаметра насадки пожежного ствола або кількості пожежних

стволів. В той же час, швидкість струменя в момент удару об стінку істотно впливає на частку води, яка відбивається у вигляді бризок, не приймаючи участі в стінканні по стінці резервуара та її охолодженні. В [12] встановлено, що при великих відстанях від ствола до стінки масова частка розбризкування визначається числом Вебера, яке є пропорційним квадрату швидкості струменя. Але вибір такого напору подачі води, який би мінімізував втрати води внаслідок розбризкування в роботі не розглянуто. В [13] наведено регресійну залежність, що пов'язує відносну масову частку бризок із числом Вебера, із якої випливає, що для чисел Вебера в діапазоні (550÷32500) втрати води внаслідок розбризкування складають (26÷73) %. Але і тут підвищення коефіцієнта використання води шляхом варіації параметрів подачі струмені не досліджено. В [14] експериментально досліджено розбризкування струменя води внаслідок його удару об вертикальну стінку. Досліджено розпад струменя і з'ясовано, що швидкість струменя, при якій досягається максимальна частка бризок, зменшувалася зі збільшенням відстані між вертикальною стінкою і виходом з насадка. Недоліком дослідження є складність розповсюдження отриманих результатів, на умови, що відрізняються від розглянутих у роботі. В [15] експериментально розглянуто розбризкування і розтікання води внаслідок удару струменя об вертикальну стінку. З'ясовано, що підвищення температури стінки призводить до збільшення частки води, що розбризкується. Але малий діаметр сопла (0,7 мм), що був використаний в експериментах, ускладняє узагальнення результатів на випадок пожежних стволів, для яких типовий діаметр складає (13÷50) мм. В [16] експериментально досліджено розпад суцільного водного струменя в процесі його руху. Але поведінку водного струменя при зіткненні з вертикальною стінкою в роботі не розглянуто.

Таким чином, невирішеною частиною проблеми розповсюдження пожежі на сусідні резервуари внаслідок теплового потоку на них є підвищення коефіцієнта використання води при охолодженні резервуарів, що горять та сусідніх з ними.

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є визначення мінімально можливого напору, який забезпечує подачу компактного водного струменя по настільній траєкторії в певну точку на стінці резервуара для її охолодження.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- побудувати модель руху водного струменя після виходу з пожежного ствола;
- визначити залежність траєкторії руху струменя від напору води;
- розробити алгоритм розв'язання задачі умовної мінімізації напору води.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є процес руху водного струменя в повітрі після виходу з пожежного ствола, предметом – параметри, що описують цей рух. Прийнято гіпотезу, що струмінь зберігає свою компактність і не розпилюється внаслідок взаємодії з повітрям, а також, що коефіцієнт опору повітря є сталим. Для інтегрування рівняння руху елементарного об'єму води були використані методи теорії лінійних диференціальних рівнянь. Для розв'язання нерівності, що визначає умову настільності траєкторії руху струменя, біло застосовано графічний метод розв'язання рівнянь. Пошук мінімального значення напору води, що забезпечує досягнення струменем води заданої точки по настільній траєкторії, проводився чисельно за допомогою метода Ньютона. Програмну реалізацію метода було виконано в середовищі Maple 18.

5. Визначення мінімального напору, що забезпечує подачу води в задану точку

5.1. Побудова моделі руху водного струменя після виходу з пожежного ствола

В системі координат, пов'язаній з пожежним стволом, рух водного струменя після виходу зі ствола може бути наближено описаний системою диференціальних рівнянь [17]

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\alpha \frac{dx}{dt}; \quad (1)$$

$$\frac{d^2z}{dt^2} = -\alpha \frac{dz}{dt} - g, \quad (2)$$

де $x(t)$, $z(t)$ – координати елементарного об'єму води через проміжок часу t після виходу з пожежного ствола; α – коефіцієнт опору повітря; g – прискорення сили тяжіння (рис. 1).

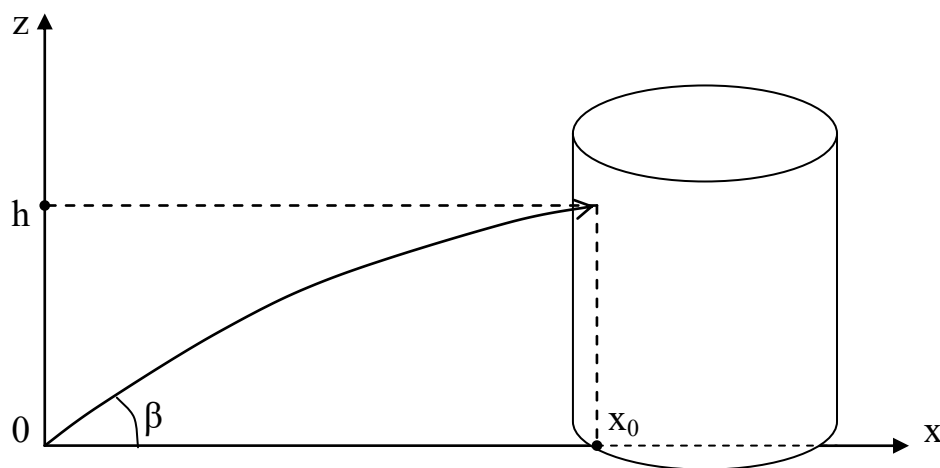


Рис. 1. Рух водного струменя після виходу із пожежного ствола

Система рівнянь (1), (2) разом з початковими умовами

$$x(0) = 0; \quad \left. \frac{dx}{dt} \right|_{t=0} = v_{0x} = v_0 \cos \beta; \quad (3)$$

$$z(0) = 0; \quad \left. \frac{dz}{dt} \right|_{t=0} = v_{0z} = v_0 \sin \beta \quad (4)$$

описує траєкторію руху водного струменя; β – кут нахилу пожежного ствола відносно горизонту; v_0 – швидкість струменя води на виході зі ствола; v_{0x} , v_{0z} – проекції вектора $\vec{v}_0$ на горизонтальну і вертикальну осі відповідно.

Розв'язання неоднорідного диференціального рівняння (2) потребує розв'язання відповідного однорідного рівняння

$$z'' = -\alpha z', \quad (5)$$

характеристичне рівняння якого має вигляд

$$\begin{aligned} r^2 + \alpha r &= 0; \\ r_1 &= 0; \quad r_2 = -\alpha. \end{aligned}$$

Це дозволило записати загальний розв'язок однорідного рівняння (5):

$$z(t) = C_1 + C_2 e^{-\alpha t},$$

де C_1, C_2 – сталі. Частинний розв'язок неоднорідного рівняння (2) шукався у вигляді

$$z_p = At,$$

де A – стала, яку було визначено шляхом підстановки частинного розв'язку в неоднорідне рівняння (2):

$$\begin{aligned} 0 &= -\alpha A - g; \\ A &= -\frac{g}{\alpha}; \\ z_p &= -\frac{g}{\alpha} t. \end{aligned}$$

Тоді загальний розв'язок неоднорідного рівняння (2):

$$z(t) = C_1 + C_2 e^{-\alpha t} - \frac{g}{\alpha} t. \quad (6)$$

Підстановка (6) в початкові умови (4) дала систему рівнянь відносно невідомих сталих C_1, C_2

$$\begin{cases} z(0) = C_1 + C_2 = 0; \\ z'(0) = -\alpha C_2 - \frac{g}{\alpha} = v_{0z}; \end{cases}$$

$$\begin{cases} C_1 = \frac{v_{0z}}{\alpha} + \frac{g}{\alpha^2}; \\ C_2 = -\frac{v_{0z}}{\alpha} - \frac{g}{\alpha^2}; \end{cases}$$

Після підстановки цих значень вираз (6) набув вигляду

$$z(t) = \frac{\alpha v_{0z} + g}{\alpha^2} [1 - \exp(-\alpha t)] - \frac{gt}{\alpha}. \quad (7)$$

Застосування аналогічного підходу до розв'язання диференціального рівняння (1) з початковими умовами (3) дало

$$x(t) = \frac{v_{0x}}{\alpha} [1 - \exp(-\alpha t)]. \quad (8)$$

Із (8) випливає, що

$$1 - \exp(-\alpha t) = \frac{\alpha x}{v_{0x}}; \quad (9)$$

$$t = -\frac{1}{\alpha} \ln \left(1 - \frac{\alpha x}{v_{0x}} \right). \quad (10)$$

Підстановка (9) і (10) у (7) дозволила отримати опис траєкторії руху струменя в явному вигляді

$$z(x) = \frac{\alpha v_{0z} + g}{\alpha v_{0x}} x + \frac{g}{\alpha^2} \ln \left(1 - \frac{\alpha x}{v_{0x}} \right), \quad (11)$$

При цьому початкова швидкість v_{0x} і горизонтальна координата x пов'язані умовою

$$v_{0x} - \alpha x > 0. \quad (12)$$

Невиконання умови (12) означає недосяжність точки з горизонтальною координатою x при горизонтальній складовій v_{0x} початкової швидкості струменя води.

5. 2. Визначення залежності траєкторії руху струменя від напору води

Нехай точка прицілювання на стінці резервуара знаходиться на відстані x_0 по горизонталі і h по висоті відносно пожежного ствола (рис. 1). Із (11) і (12) випливає, що умовою попадання водного струменя в точку (x_0, h) є

$$h = \frac{\alpha v_{0z} + g}{\alpha v_{0x}} x_0 + \frac{g}{\alpha^2} \ln \left(1 - \frac{\alpha x_0}{v_{0x}} \right); \quad (13)$$

$$v_{0x} - \alpha x_0 > 0.$$

Із даної умови було отримано залежність вертикальної складової швидкості водного струменя від її горизонтальної складової

$$z'' = -\alpha z', \quad (5)$$

$$v_{0z} = \frac{v_{0x}}{x_0} \left[h - \frac{g}{\alpha^2} \ln \left(1 - \frac{\alpha x_0}{v_{0x}} \right) \right] - \frac{g}{\alpha}. \quad (14)$$

Об'єднання виразів для вертикальної і горизонтальної складових початкової швидкості дало вираз для квадрата початкової швидкості v_0

$$v_0^2 = v_{0x}^2 + v_{0z}^2, \quad (15)$$

$$v_0^2 = v_{0x}^2 + \left[\frac{v_{0x}}{x_0} \left(h - \frac{g}{\alpha^2} \ln \left(1 - \frac{\alpha x_0}{v_{0x}} \right) \right) - \frac{g}{\alpha} \right]^2. \quad (16)$$

Початкова швидкість струменя води v_0 пов'язана з напором H на виході з насадку співвідношенням

$$v_0^2 = 2gH. \quad (17)$$

Тоді напір води на виході з насадку пожежного ствола, який забезпечує подачу води у точку (x_0, h) , має вигляд

$$H = \frac{v_{0x}^2}{2g} + \frac{1}{2g} \left[\frac{v_{0x}}{x_0} \left(h - \frac{g}{\alpha^2} \ln \left(1 - \frac{\alpha x_0}{v_{0x}} \right) \right) - \frac{g}{\alpha} \right]^2. \quad (18)$$

Вертикальні сталеві резервуари місткістю від 1000 до 5000 м³ мають висоту 12 м, а резервуари місткістю від 10000 до 50000 м³ – 18 м [18]. На рис. 2 проілюстровано залежність (18) для різних значень відстані x_0 від ствола до резервуара. При цьому висоту подачі біло прийнято $h=12$ м, а коефіцієнт опору повітря $\alpha=0,6$ с⁻¹.

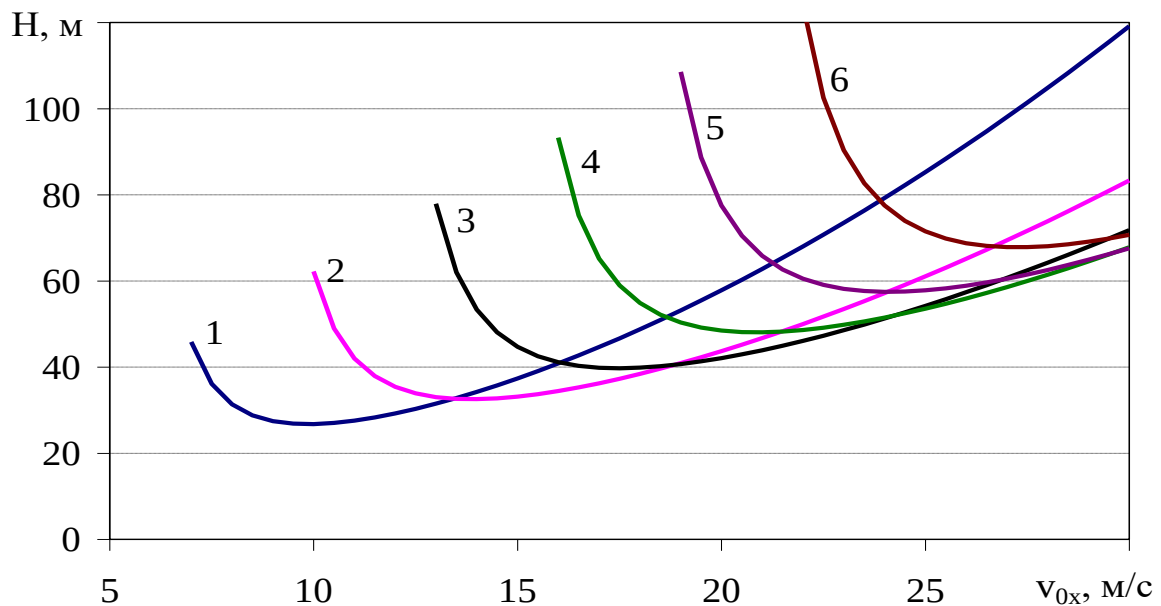


Рис. 2. Залежність напору води на виході з насадку від горизонтальної складової швидкості при подачі в точку на стінці резервуара на висоті 12 м для різних значень відстані до резервуара: 1 – $x_0=10$ м; 2 – $x_0=15$ м; 3 – $x_0=20$ м; 4 – $x_0=25$ м; 5 – $x_0=30$ м; 6 – $x_0=35$ м

Аналіз залежностей, наведених на рис. 2, свідчить, що для даної відстані між стволом і резервуаром існує мінімальне значення напору води, при якому вода досягає заданої точки на стінці резервуара.

Складові вектора швидкості струменя води в момент удару об стінку резервуара визначаються шляхом диференціювання виразів (7) і (8) за t

$$v_x = \frac{dx}{dt} = v_{0x} \exp(-\alpha t); \quad (19)$$

$$v_z = \frac{dz}{dt} = \frac{\alpha v_{0z} + g}{\alpha} \exp(-\alpha t) - \frac{g}{\alpha}, \quad (20)$$

де час t досягнення точки прицілювання обчислювався за допомогою

$$t = -\frac{1}{\alpha} \ln \left(1 - \frac{\alpha x_0}{v_{0x}} \right). \quad (21)$$

Підстановка (21) в (19) і (20) дала

$$v_x = v_{0x} - \alpha x_0$$

$$v_z = \frac{\alpha v_{0z} + g}{\alpha} \left(1 - \frac{\alpha x_0}{v_{0x}} \right) - \frac{g}{\alpha} = v_{0z} \left(1 - \frac{\alpha x_0}{v_{0x}} \right) - \frac{g x_0}{v_{0x}}. \quad (22)$$

На рис. 3 показано вплив напору води на горизонтальну v_x і вертикальну v_z складові швидкості струменя в момент удару об стінку резервуара на висоті 12 м і відстані 10 м.

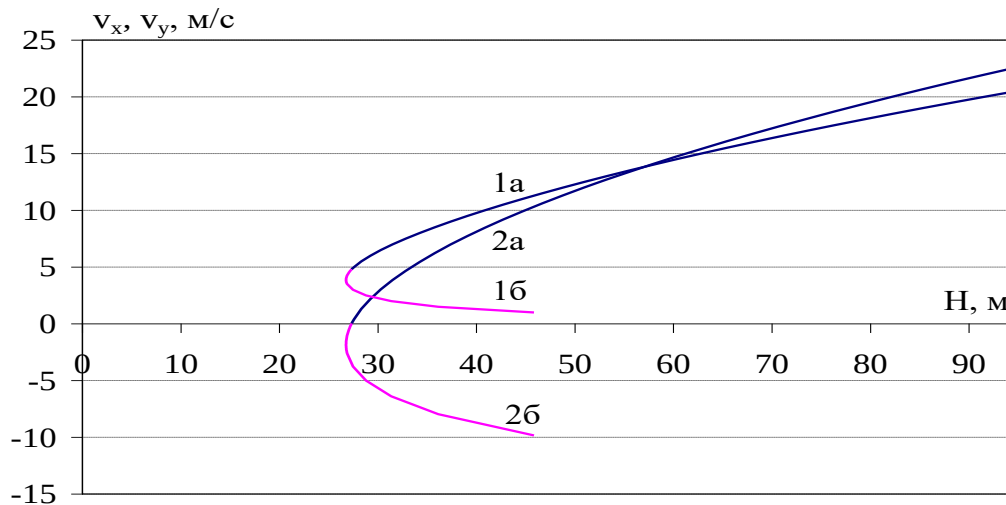


Рис. 3. Залежність горизонтальної (1) і вертикальної (2) складових швидкості струменя в кінцевій точці ($x_0=10$ м, $h=12$ м) від напору води: а – настільна траєкторія; б – навісна траєкторія

Аналіз графічних залежностей на рис. 3 свідчить, що існує мінімальна величина напору, при якій струмінь досягає заданої точки на стінці резервуара. При збільшенні напору з'являються дві можливих траєкторії руху струменя, причому починаючи з деякого значення H^* одна з траєкторій стає настільною (а), а інша – навісною (б).

Із (22) випливає умова, коли траєкторія є настільною

$$v_z = v_{0z} \left(1 - \frac{\alpha x_0}{v_{0x}} \right) - \frac{g x_0}{v_{0x}} > 0;$$

$$v_{0z} > \frac{gx_0}{v_{0x} - \alpha x_0}.$$

Із врахуванням (15) і (17) остання нерівність перетворилася на

$$H > \frac{gx_0^2}{2(v_{0x} - \alpha x_0)^2} + \frac{v_{0x}^2}{2g},$$

що після підстановки (18) дало

$$\frac{v_{0x}}{\alpha x_0} \left(\frac{\alpha^2 h}{g} - \ln \left(1 - \frac{\alpha x_0}{v_{0x}} \right) \right) > \frac{v_{0x}}{v_{0x} - \alpha x_0}. \quad (23)$$

Нехай

$$y = \frac{\alpha x_0}{v_{0x}}. \quad (24)$$

Це дозволило перетворити (23) на

$$\begin{aligned} \frac{1}{y} \left(\frac{\alpha^2 h}{g} - \ln(1-y) \right) &> \frac{1}{1-y}; \\ \frac{y}{1-y} + \ln(1-y) &< \frac{\alpha^2 h}{g}. \end{aligned} \quad (25)$$

Отримана нерівність являє собою умову настільного характеру траєкторії руху струменя. Ліва частина нерівності (25) є монотонною функцією на півінтервалі $[0; 1)$ і прямує до нескінченності при наближенні y до 1 (рис. 4).

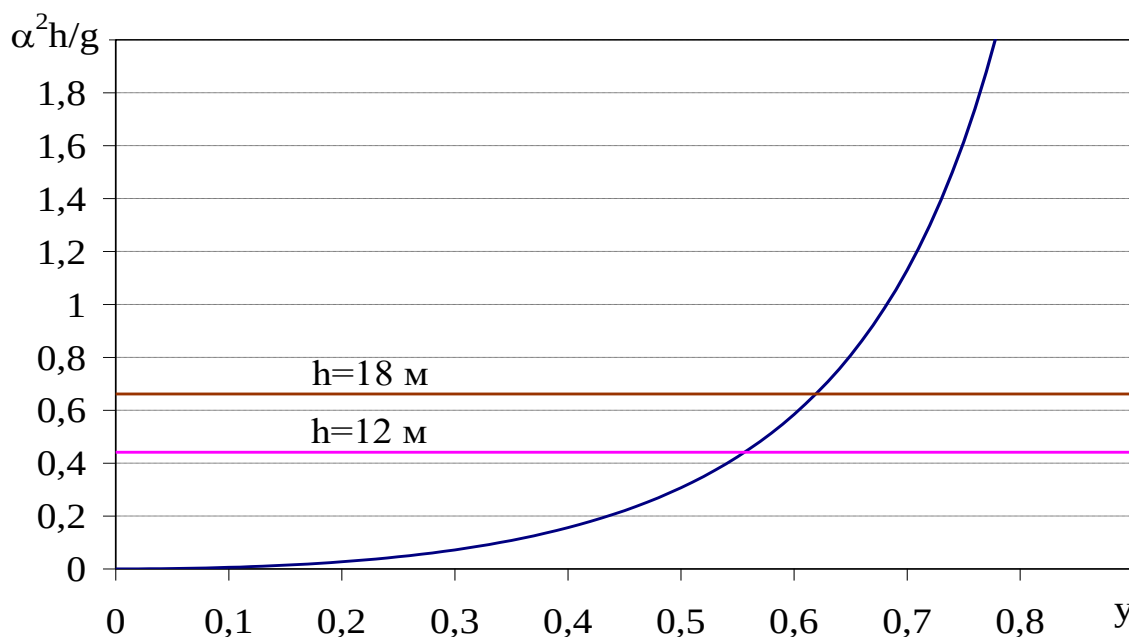


Рис. 4. Графічний розв'язок нерівності (25) при $\alpha=0,6 \text{ с}^{-1}$

Це означає, що існує єдиний розв'язок у* рівняння

$$\frac{y}{1-y} + \ln(1-y) = \frac{\alpha^2 h}{g}; y \in [0;1], \quad (26)$$

а умовою настильності траєкторії є виконання нерівності

$$v_{0x} > v_{0x}^{(H)} = \frac{\alpha x_0}{y^*}. \quad (27)$$

Зокрема, при $\alpha=0,6 \text{ с}^{-1}$ і $h=12 \text{ м}$ розв'язком рівняння (26) є $y_{12}=0,56$, а при $h=18 \text{ м}$ – $y_{18}=0,62$. Тоді мінімальні значення горизонтальної складової початкової швидкості струменя дорівнюють:

$$\begin{aligned} v_{\text{ох наст}} &= 1,07x_0, \quad h = 12 \text{ м}; \\ v_{\text{ох наст}} &= 0,97x_0, \quad h = 18 \text{ м}. \end{aligned}$$

Виконання нерівності

$$v_{0x} > v_{\text{ох наст}} \quad (28)$$

забезпечує настильну траєкторію руху струменя води. Підстановка у формулу (18) значення v_{0x} , що задовольняє нерівності (28), дає величину напору H , якій відповідає настильна траєкторія.

5.3. Розробка алгоритму розв'язання задачі умовної мінімізації напору води

Вираз (18) являє собою залежність напору води на виході з насадка від горизонтальної складової швидкості водного струменя. При цьому умовою досяжності струменем стінки резервуара є нерівність (12), умовою настильності траєкторії – нерівність (28). Отже існує певний діапазон значень напору і кута подачі струменя, що забезпечують потрапляння струменя в задану точку по настильній траєкторії. Серед всіх можливих значень напору важливою є мінімальна величина напору, при якому точка (x_0, h) на поверхні резервуара є досяжною настильній траєкторії:

$$H_{\min} = \min_{v_{0x}} H(v_{0x}). \quad (29)$$

Складність функції (18) не дозволяє знайти розв'язок задачі (29) аналітичними методами. Тому її розв'язання було виконано чисельно із застосування методу Ньютона. Його сутність полягає в наступному.

1. Обрати початкове значення горизонтальної складової початкової швидкості струменя

$$v_{0x}^{(0)} = \max\{v_{\text{ох наст}}; \alpha x_0 + 0,1\}. \quad (30)$$

2. Обрати точність обчислення ε для горизонтальної складової швидкості струменя.

3. Покласти $k=1$.

4. Обчислити

$$v_{0x}^{(k)} = \max \left\{ v_{0x}^{(k-1)} - \frac{H' \left(v_{0x}^{(k-1)} \right)}{H'' \left(v_{0x}^{(k-1)} \right)}; v_{0x \text{ наст}} \right\}. \quad (31)$$

5. Якщо

$$\left| v_{0x}^{(k)} - v_{0x}^{(k-1)} \right| < \varepsilon,$$

то перейти до кроку 7.

6. Покласти $k=k+1$ і перейти до кроку 4.

7. Покласти

$$v_{0x}^{(\min)} = v_{x0}^{(k)}; H_{\min} = H \left(v_{0x}^{(\min)} \right).$$

В якості приклада на рис. 5 наведено результати розрахунків мінімального напору для подачі води по настільній траєкторії на висоту 12 м (РВС-1000 – РВС-5000) і на висоту 18 м (РВС-10000 – РВС-50000). Значення коефіцієнту опору повітря $\alpha = 0,6 \text{ с}^{-1}$.

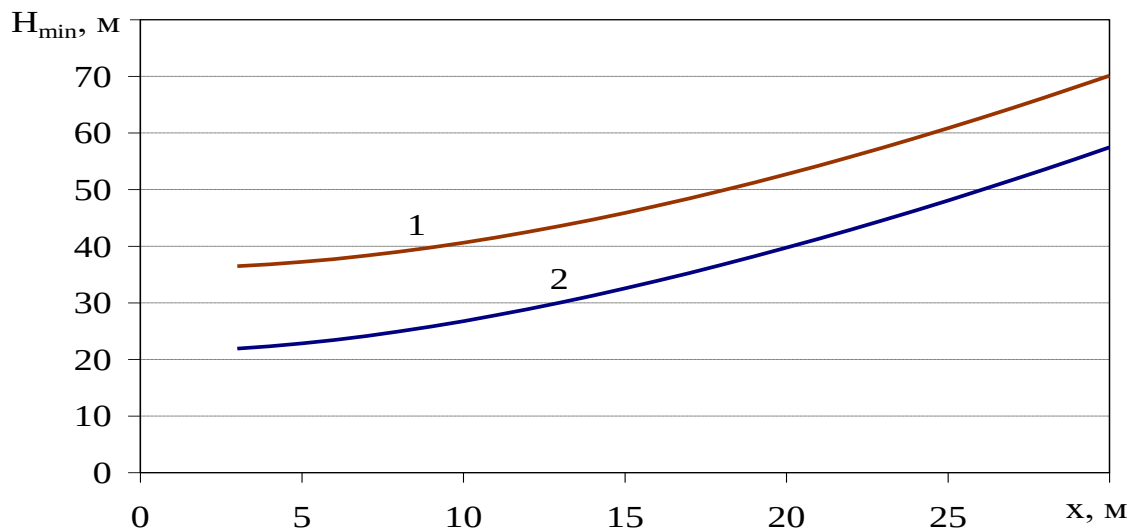


Рис. 5. Залежність напору води для подачі на охолодження стінки резервуара від відстані до нього: 1 – на висоту 18 м; 2 – на висоту 12 м

Залежності, наведені на рис. 5, дають мінімальні значення напору. При їх практичному використанні доцільно обирати дещо більші значення, щоб компенсувати похибки моделі, похибки оцінки відстані, вплив вітру тощо. В той же час, бажано не перевищувати істотно ці значення, оскільки чим більшою є швидкість струменя в момент удару об стінку, тим більша частка води втрачається внаслідок відбиття від стінки.

6. Обговорення результатів визначення мінімального напору, що забезпечує подачу води в задану точку

Недоліком подачі води на охолодження стінки резервуара за допомогою

стаціонарних гідромоніторів або пожежних стволів з пересувної техніки є те, що частина води відбивається від стінки при ударі струменя об неї. Це призводить до того, що ця частина води втрачається, не приймаючи участі в охолодженні. Величина коефіцієнта використання води (відношення об'єму води, що стікає по стінці, до загального об'єму поданої води) залежить від швидкості струменя в момент удару об стінку і кута, який струмінь утворює зі стінкою. Низка експериментальних досліджень свідчить, що для типових швидкостей струменя коефіцієнт використання води складає близько $(30 \div 70) \%$. Одним із шляхів підвищення величини коефіцієнта використання води є зменшення швидкості струменя в точці його удару об стінку резервуара.

Для побудови траєкторії руху водного струменя розглянуто рух елементарного об'єму води в полі сили тяжіння з урахуванням опору повітря – рівняння (1–2). При цьому припускається, що сила опору повітря пропорційна швидкості руху струменя, а коефіцієнт опору є сталим [17]. Систему координат обрано таким чином, що її початок співпадає з пожежним стволом, а вісь z направлена вертикально вгору (рис. 1). Система рівнянь (1), (2) разом з початковими умовами (3), (4) описує рух елементарного об'єму води після виходу з пожежного ствола, а значить, дає можливість визначити траєкторію водного струменя. Рівняння (1), (2) є лінійними диференціальними рівняннями, при цьому (1) – однорідне рівняння, а (2) – неоднорідне. Застосування загального методу розв'язку зазначеного типу рівнянь дало можливість отримати розв'язання задачі (1–4) у вигляді залежностей просторових координат (7), (8) від часового параметра t . Шляхом вираження часового параметра через горизонтальну координату x (перетворення (9), (10)) було отримано залежність вертикальної координати точки на траєкторії струменя від горизонтальної координати у вигляді (11). Її аналіз свідчить, що доступний діапазон досяжності струменя по горизонталі обмежений нерівністю (12).

Для того, щоб струмінь води досяг певної точки на стінці вертикального сталевго резервуара, необхідним і достатнім є виконання умови (13), що накладає обмеження на значення вертикальної і горизонтальної складових вектора швидкості струменя води на виході зі ствола. Вираз в явному вигляді для вертикальної складової швидкості (14) дозволив одержати співвідношення (16), що пов'язує швидкість водного струменя на виході з пожежного ствола з горизонтальною складовою за умови досягнення заданої точки на стінці резервуара. Загальноприйнятою характеристикою подачею води зі ствола є її напір. Напір води пов'язаний зі швидкістю її виходу зі ствола співвідношенням (17). Це дозволило отримати залежність напору води від горизонтальної складової її швидкості на виході зі ствола (18) за умови, що струмінь досягає заданої точки на стінці резервуара. Аналіз графічних залежностей на рис. 2 свідчить, що існує певне значення горизонтальної складової швидкості, яке відповідає мінімальному значенню напору води. Зменшення горизонтальної швидкості буде означати більший кут нахилу ствола β відносно горизонту (рис. 1). Збільшення горизонтальної складової швидкості буде означати зменшення кута нахилу ствола відносно горизонту. Отже, мінімально можливому напору води відповідає лише одна траєкторія руху струменя, при якій задана точка на стінці резервуара є досяжною, в той час як при більших значеннях напору можливі дві траєкторії. При подальшому збільшенні напору одна з траєкторій матиме настільний вид, а інша – навісний (рис. 3). Навісним траєкторіям відповідають такі значення напору, при яких вертикальна складова швидкості в момент удару об стінку резервуара є від'ємною (рис. 3). Аналіз

залежностей на рис. 3 свідчить, що при навісній траєкторії горизонтальна складова швидкості в момент контакту зі стінкою є меншою, ніж при настільній траєкторії. Модуль швидкості також є меншим при навісній траєкторії. В той же час, для практичного використання більш зручною є настільна траєкторія. Характер траєкторії струменя визначається співвідношенням між горизонтальною і вертикальною складовими вектора швидкості струменя на виході зі ствола, а також відстанню по горизонталі до точки прицілювання – нерівність (25). Графічне розв'язання зазначеної нерівності (рис. 4) дозволяє визначити граничне значення горизонтальної складової початкової швидкості водного струменя, при перевищенні якого траєкторія водного струменя буде мати настільний характер – формула (27).

Задача пошуку мінімально можливого напору води, що забезпечує досягнення певної точки по настільній траєкторії, є задачею мінімізації (29). Особливістю функції (18) є її опуклість донизу і наявність одного екстремуму, а саме, мінімуму (рис. 2). Це дозволяє ефективно застосувати такий чисельний метод оптимізації як метод Ньютоні. Починаючи з деякого початкового значення горизонтальної складової швидкості (30) за допомогою ітераційної процедури (31) визначається величина горизонтальної складової швидкості, що забезпечує мінімальне значення напору води (29).

Величина необхідного напору зростає із збільшенням відстані і висоти точки подачі (рис. 5). При практичному використанні отриманих залежностей необхідно обирати дещо більші значення, оскільки при розрахованих значеннях тиску струмін води буде мати нульову швидкість в момент зіткнення зі стінкою. В той же час істотне перевищення напору призведе до зменшення коефіцієнта використання води внаслідок збільшення частки води, що розбризкується після удару струменя о стінку. В якості орієнтовної величини напору доцільно наведені на рис. 5 значення збільшити на $(5 \div 10) \%$.

Запропонована модель може бути застосована при побудові планів реагування на надзвичайні ситуації, пов'язані з горінням горючих рідин на складах нафти і нафтопродуктів.

Обмеженням запропонованого підходу є те, що він припускає компактну форму водного струменя від виходу з насадка пожежного ствола і до досягнення стінки резервуара. В дійсності має місце розпилення струменя, яке збільшується із збільшенням напору.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з врахуванням часткового розпилення водного струменя.

7. Висновки

1. Побудовано модель руху елементарного об'єму води в полі сили тяжіння за умови сталого значення коефіцієнта опору повітря. Модель являє собою систему лінійних однорідного і неоднорідного диференціальних рівнянь 2-го порядку з початковими умовами, що описують координати пожежного ствола і швидкість струменя на виході з нього. Інтегрування зазначеної системи рівнянь дозволяє визначити траєкторію руху струменя води в залежності від горизонтальної і вертикальної складових початкової швидкості струменя.

2. Показано, що залежність напору від горизонтальної складової початкової швидкості струменя води за умови досягнення струменем заданої точки є опуклою донизу функцією з єдиною точкою екстремуму – мінімумом. При збільшенні напору вище мінімального значення, що забезпечує подачу води в задану точку, є

дві можливих траєкторії руху водного струменя – настільна і навісна. З'ясовано, що при навісній траєкторії модуль швидкості водного струменя в момент удару є меншим порівняно з настільною траєкторією. Показано, що умовою настільності траєкторії є перевищення горизонтальною складовою початковою швидкості деякого граничного значення, яке є пропорційним відстані до резервуара. Для резервуарів висотою 12 м (РВС-1000 – РВС-5000) коефіцієнт пропорційності складає $0,97 \text{ с}^{-1}$, а для резервуарів висотою 18 м (РВС-10000 – РВС-50000) – $1,07 \text{ с}^{-1}$.

3. Побудовано алгоритм розрахунку мінімально можливого напору подачі води на охолодження резервуара в залежності від відстані до точки прицілювання по горизонталі і вертикалі. Зміст алгоритму полягає у використанні методу Ньютона для чисельного розв'язання задачі мінімізації напору води за умови досягнення водним струменем певної точки по настільній траєкторії. Показано, що для резервуарів з висотою стінки 12 м напір води має становити $(23 \div 58)$ м при відстані до резервуара $(5 \div 30)$ м, а для резервуарів з висотою стінки 18 м – $(37 \div 70)$ м для такого самого діапазону значень відстані до резервуара.

Література

1. Khan F. I., Abbasi S. A. An assessment of the likelihood of occurrence, and the damage potential of domino effect (chain of accidents) in a typical cluster of industries. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2001. Vol. 14(4). P. 283–306. doi: 10.1016/S0950-4230(00)00048-6
2. Yang R., Khan F., Neto E. T., Rusli R., Ji J. Could pool fire alone cause a domino effect? *Reliability Engineering & System Safety*. 2020. Vol. 202. P. 106976. doi: 10.1016/j.ress.2020.106976
3. Reniers G., Cozzani V. Features of Escalation Scenarios. *Domino Effects in the Process Industries*. 2013. P. 30–42. doi: 10.1016/B978-0-444-54323-3.00003-8
4. Amin M. T., Scarponi G. E., Cozzani V., Khan F. Improved pool fire-initiated domino effect assessment in atmospheric tank farms using structural response. *Reliability Engineering & System Safety*. 2024. Vol. 242. P. 109751. doi: 10.1016/j.ress.2023.109751
5. Kustov M. V., Kalugin V. D., Tutunik V. V., Tarakhno E. V. Physicochemical principles of the technology of modified pyrotechnic compositions to reduce the chemical pollution of the atmosphere. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*. 2019. Vol. 1. P. 92–99. doi: 10.32434/0321-4095-2019-122-1-92-99
6. Одинець А., Ніжник В., Сізіков О., Фещук Ю., Балло Я., Климась Р., Жихарев О. Обґрунтування додаткових заходів щодо оперативних дій під час гасіння пожеж на складах нафтопродуктів в умовах бойових дій. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2022. № 1(13). С. 72–79. doi: 10.33269/nvcz.2022.1(13).72-79
7. НАПБ 05.035 – 2004. Інструкція щодо гасіння пожеж у резервуарах із нафтою та нафтопродуктами. URL; https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/instrukciya_schodo_gasinnya_pozhezh_u_rezervuarakh_iz_naftoyu.pdf
8. Abramov Y., Basmanov O., Salamov J., Mikhayluk A., Yashchenko O. Developing a model of tank cooling by water jets from hydraulic monitors under conditions of fire. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 1/10(97). P. 14–20. doi: 10.15587/1729-4061.2019.154669.
9. Basmanov O., Oliinyk V., Afanasenko K., Hryhorenko O., Kalchenko Y. Developing the model of water cooling an oil tank in the case of fire. *Eastern-European*

Journal of Enterprise Technologies. 2024. Vol. 5/10(131). P. 53–61. doi: 10.15587/1729-4061.2024.313827

10. Saber A., El-Nasr M. A., Elbanhawey A. Y. Generalized formulae for water cooling requirements for the fire safety of hydrocarbon storage tank farms. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2022. Vol. 80. P. 104916. doi: 10.1016/j.jlp.2022.104916

11. Oliinyk V., Basmanov O., Shevchenko O., Khmyrova A., Rushchak I. Building a model of choosing water supply rate to cool a tank in the case of a fire. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2025. Vol. 1/10(133). P. 45–51. doi: 10.15587/1729-4061.2025.323197

12. Wassenberg J. R., Stephan P., Gambaryan-Roisman T. The influence of splattering on the development of the wall film after horizontal jet impingement onto a vertical wall. Experiments in Fluids. 2019. Vol. 60(11). doi: 10.1007/s00348-019-2810-6

13. Qian S., Zhu D. Z., Xu H. Splashing generation by water jet impinging on a horizontal plate. Experimental Thermal and Fluid Science. 2022. Vol. 130. P. 110518. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2021.110518

14. Kim H., Choi H., Kim D., Chung J., Kim H., Lee K. Experimental study on splash phenomena of liquid jet impinging on a vertical wall. Experimental Thermal and Fluid Science. 2020. Vol. 116. P. 110111. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2020.110111

15. Hu B., Zhao T., Shi Z., Li W., Lin Q., Liu H., Wang F. Spreading and splashing of liquid film on vertical hot surface by inclined jet impingement. Experimental Thermal and Fluid Science. 2024. Vol. 154. P. 111147. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2024.111147

16. Liu X., Wang J., Li B., Li W. Experimental study on jet flow characteristics of fire water monitor. The Journal of Engineering. 2018. Vol. 2019(13). P. 150–154. doi: 10.1049/joe.2018.8950

17. Abramov Y., Basmanov O., Krivtsova V., Khyzhnyak A. Estimating the influence of the wind exposure on the motion of an extinguishing substance. EUREKA: Physics and Engineering. 2020. Vol. 5. P. 51–59. doi: 10.21303/2461-4262.2020.001400

18. ДСТУ Б В.2.6-183:2011. Резервуари вертикальні циліндричні сталеві для нафти та нафтопродуктів. Загальні технічні умови.

O. Basmanov¹, DSc, Professor, Leading Researcher of the Department

V. Oliinyk¹, PhD, Associated Professor, Head of Department

Ye. Morshch², DSc, Head of the Department of Scientific and Technical Expertise

Y. Kalchenko¹, PhD, Associate Professor of the Department

¹National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

²State Research Institute of Cybersecurity and Information Protection Technologies, Kyiv, Ukraine

DETERMINING THE MINIMUM WATER PRESSURE FOR SUPPLYING IT FOR COOLING THE TANK

A model of the water jet motion after exiting the fire nozzle has been constructed. The model is based on a system of linear homogeneous and linear inhomogeneous 2nd-order differential equations with initial conditions that describe the motion of an elementary volume of water in a gravitational field and take into account air drag. Their solving with the initial conditions gives the trajectory of the water jet motion depending on the horizontal and vertical components of the initial jet velocity. The dependence of the water pressure on the horizontal component of the water jet velocity at the fire nozzle provided that the jet reaches a given point on the tank shell has been constructed. It is shown that the dependence is a downward convex function with a single minimum point. Only one trajectory of the jet

Fire Safety. DOI: 10.52363/2524-0226-2025-41-10

motion corresponds to the minimum water pressure, which reaches a given point. An increase in the pressure leads to the appearance of two possible trajectories, one of which is grazing, and the other can be grazing or flat. It is shown that the condition for the trajectory to be flat is that the horizontal component of the velocity exceeds a certain limit value that is proportional to the distance to the tank. An algorithm for determining the minimum water pressure for supplying to a given point on the tank shell by a flat trajectory is constructed. The algorithm uses Newton's method to numerically solve the conditional optimization problem. It is shown that for a distance to the tank ($5 \div 30$) m the water pressure should be ($23 \div 58$) m for tanks 12 m high and ($37 \div 70$) m for tanks 18 m high.

The obtained results can be used to determine the locations of fire nozzles for supplying water to cool tanks while developing a plan for localizing and eliminating fires in a oil tank storage and to reduce water losses due to the splattering of the jet after hitting the tank.

Keywords: fire nozzle, cooling water supply, water jet trajectory, flat trajectory

References

1. Khan, F. I., Abbasi, S. A. (2001). An assessment of the likelihood of occurrence, and the damage potential of domino effect (chain of accidents) in a typical cluster of industries. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 14(4), 283–306. doi: 10.1016/S0950-4230(00)00048-6
2. Yang, R., Khan, F., Neto, E. T., Rusli, R., Ji, J. (2020). Could pool fire alone cause a domino effect? *Reliability Engineering & System Safety*, 202, 106976. doi: 10.1016/j.ress.2020.106976
3. Reniers, G., Cozzani, V. (2013). Features of Escalation Scenarios. *Domino Effects in the Process Industries*, 30–42. doi: 10.1016/B978-0-444-54323-3.00003-8
4. Amin, M. T., Scarponi, G. E., Cozzani, V., Khan, F. (2024). Improved pool fire-initiated domino effect assessment in atmospheric tank farms using structural response. *Reliability Engineering & System Safety*, 242, 109751. doi: 10.1016/j.ress.2023.109751
5. Kustov, M. V., Kalugin, V. D., Tutunik, V. V., Tarakhno, E. V. (2019). Physicochemical principles of the technology of modified pyrotechnic compositions to reduce the chemical pollution of the atmosphere. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, (1), 92–99. doi: 10.32434/0321-4095-2019-122-1-92-99
6. Odynets, A., Nizhnyk, V., Sizikov, O., Feschuk, Y., Ballo, Y., Klymas, R., Zhykharev, O. (2022). Justification of additional measures for operational actions during fire extinguishing in petroleum products warehouses in conditions of combat. *Scientific Bulletin: Civil Protection and Fire Safety*, (1(13)), 72–79. doi: 10.33269/nvcz.2022.1(13).72-79
7. NAPB 05.035 – 2004. Instructions for extinguishing fires in tanks with oil and petroleum products.
8. Abramov, Y., Basmanov, O., Salamov, J., Mikhayluk, A., Yashchenko, O. (2019). Developing a model of tank cooling by water jets from hydraulic monitors under conditions of fire. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(10(97)), 14–20. doi: 10.15587/1729-4061.2019.154669
9. Basmanov, O., Oliinyk, V., Afanasenko, K., Hryhorenko, O., Kalchenko, Y. (2024). Building a model of oil tank water cooling in the case of fire. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(10(131)), 53–61. doi: 10.15587/1729-4061.2024.313827
10. Saber, A., El-Nasr, M. A., Elbanhawy, A. Y. (2022). Generalized formulae for water cooling requirements for the fire safety of hydrocarbon storage tank farms. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 80, 104916. doi: 10.1016/j.jlp.2022.104916

11. Oliinyk, V., Basmanov, O., Shevchenko, O., Khmyrova, A., Rushchak, I. (2025). Building a model of choosing water supply rate to cool a tank in the case of a fire. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(10(133)), 45–51. doi: 10.15587/1729-4061.2025.323197
12. Wassenberg, J. R., Stephan, P., Gambaryan-Roisman, T. (2019). The influence of splattering on the development of the wall film after horizontal jet impingement onto a vertical wall. *Experiments in Fluids*, 60(11). doi: 10.1007/s00348-019-2810-6
13. Qian, S., Zhu, D. Z., Xu, H. (2022). Splashing generation by water jet impinging on a horizontal plate. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 130, 110518. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2021.110518
14. Kim, H., Choi, H., Kim, D., Chung, J., Kim, H., Lee, K. (2020). Experimental study on splash phenomena of liquid jet impinging on a vertical wall. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 116, 110111. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2020.110111
15. Hu, B., Zhao, T., Shi, Z., Li, W., Lin, Q., Liu, H., Wang, F. (2024). Spreading and splashing of liquid film on vertical hot surface by inclined jet impingement. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 154, 111147. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2024.111147
16. Liu, X., Wang, J., Li, B., Li, W. (2018). Experimental study on jet flow characteristics of fire water monitor. *The Journal of Engineering*, 2019(13), 150–154. doi: 10.1049/joe.2018.8950
17. Abramov, Y., Basmanov, O., Krivtsova, V., Khyzhnyak, A. (2020). Estimating the influence of the wind exposure on the motion of an extinguishing substance. *EUREKA: Physics and Engineering*, 5, 51–59. doi: 10.21303/2461-4262.2020.001400
18. DSTU B V.2.6-183:2011. Vertical cylindrical steel tanks for oil and oil products. General technical conditions.

Надійшла до редколегії: 28.02.2025

Прийнята до друку: 21.04.2025