УДК 519.6

М. В. Максименко, *ад'юнкт ад'юнктури (ORCID 0000-0002-1888-4815)*
Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

МОДЕЛЬ ОХОЛОДЖЕННЯ СТІНКИ РЕЗЕРВУАРА ВОДОЮ ПРИ ПОЖЕЖІ В СУСІДНЬОМУ РЕЗЕРВУАРІ

Розглянуто охолодження стінки резервуара водою в умовах пожежі в сусідньому резервуарі. Побудовано модель охолоджувальної дії водної плівки, що стікає по стінці резервуара. Модель спирається на рівняння теплового балансу стінки резервуара і рівняння теплового балансу для водної плівки. Модель враховує променевий теплообмін стінки з факелом, навколишнім середовищем і внутрішнім простором резервуару; конвекційний теплообмін стінки з водою і пароповітряною сумішшю в газовому просторі резервуару. Основним припущенням моделі є припущення про сталу швидкість стікання води і, відповідно, сталу товщину шару води на стінці. Для розв'язання рівнянь теплового балансу стінки і водної плівки використано метод скінчених різниць. Значення коефіцієнтів конвекційного теплообміну знайдено із застосуванням методів теорії подібності. Коефіцієнт конвекційного теплообміну між стінкою і водною плівкою має лінійну залежність від температури води і степеневу залежність від інтенсивності подачі води на охолодження. Визначено, що коефіцієнт конвекційного теплообміну між стінкою і водною плівкою на 3 порядки перевищує коефіцієнт конвекційного теплообміну стінки з повітрям. Показано, що розподіл температур в стінці резервуара і водній плівці збігається до усталеного розподілу. Поєднання рівнянь теплового балансу для стінки і водної плівки дозволяє побудувати алгоритм розрахунку температур в стінці резервуара і водній плівці. Суть алгоритму полягає в послідовному обчисленні усталеного значення температури стінки і приросту температури водної плівки в точках, розташованих вздовж вертикалі на стінці резервуара з певним кроком. Алгоритм починає роботу з точки на верхньому краї стінки резервуара і закінчує у точці на рівні нафтопродукту. Отримані результати можуть бути використані для визначення інтенсивності подачі води на охолодження стінки резервуара при пожежі в сусідньому резервуарі.

Ключові слова: пожежа в резервуарі, тепловий вплив пожежі, теплообмін, охолодження водою

1. Вступ

Накопичення значного об'єму легкозаймистих і горючих рідин на відносно невеликій площі резервуарних парків призводить до підвищеної їх пожежної небезпеки. Для зберігання нафти і нафтопродуктів в Україні і світі, як правило, використовуються вертикальні сталеві резервуари (РВС). Пожежа в резервуарному парку особливо небезпечна внаслідок можливості її розповсюдження на сусідні резервуари. Такі пожежі призводять як до значних матеріальних збитків, так і людських жертв [1]. Розповсюдження пожежі відбувається внаслідок нагріву сталевих конструкцій сусідніх резервуарів під тепловим впливом пожежі. Їх нагрів до температури самоспалахування парів нафтопродукту може призвести до вибуху пароповітряної суміші в газовому просторі резервуара (якщо концентрація парів знаходиться в межах між нижньою і верхньою концентраційною межею розповсюдження полум'я) або до виникнення горіння на дихальних пристроях (якщо концентрація парів в газовому просторі перевищує верхню концентраційну межу розповсюдження полум'я). Крім того, тепловий вплив пожежі призводить до втрати міцності сталевими конструкціями [2], внаслідок чого має місце, зокрема, розгерметизація фланцевих з'єднань.

Причиною пожежі в резервуарному парку може стати як технологічний збій, наприклад, переповнення резервуара під час його заповнення, так і проведення регламентних робіт [3].

© М. В. Максименко

Окрім масштабних збитків резервуарним паркам і природним ландшафтам [4], пожежі на складах нафти і нафтопродуктів призводять до значного викиду забруднюючих речовин в атмосферу [5]. Розповсюджуючись на великі відстані, вони негативно впливають на стан повітря [6].

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

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Експериментальне дослідження щодо швидкості вигорання рідини в нестаціонарних умовах на прикладі n-гептану, дизеля, гасу і бензину наведено в [7]. Але тепловий вплив пожежі на сусідні технологічні об'єкти не розглядається. В [8] із застосуванням середовища моделювання динаміки пожеж (FDS) досліджено тепловий вплив пожежі на сусідній резервуар з нафтопродуктом, розраховано зони безпечного розміщення сил та засобів, які задіяні для ліквідації пожежі. До недоліків слід віднести неможливість узагальнення отриманих результатів.

Тепловий вплив пожежі в резервуарі з нафтопродуктом на аналогічний сусідній резервуар досліджено в [9]. Із застосуванням рівняння теплопровідності визначено розподіл температур всередині стінки резервуара. Модель враховує променевий теплообмін з факелом пожежі та розігрітими стінками резервуара, що горить. Конвекційний теплообмін в роботі залишено поза увагою. В [10] запропоновано модель теплового впливу полум'я на сусідній резервуар з нафтопродуктом. При цьому нижня частина полум'я має високу температуру, а верхня частина – низьку. Недоліком моделі є те, що неврахованими залишаються різні температури на зовнішній і внутрішній поверхнях стінки резервуара. В [11] розглянуто вплив пульсацій полум'я на тепловий потік від пожежі. Досліджено міцність конструкцій резервуара, що нагріваються під впливом пожежі. Але наслідки розігріву сталевих конструкцій до температури самоспалахування парів нафтопродукту залишено поза увагою.

В [12] проаналізовано вплив пожежі в сусідньому резервуарі і пожежі в обвалуванні на резервуар з нафтопродуктом, але вплив вітру на тепловий потік від пожежі не досліджено. В [13] побудовано модель теплового впливу пожежі розливу нафтопродукту в обвалуванні, але випадок горіння сусідньому резервуарі не розглянуто.

В [14] побудовано модель теплового балансу для стінки резервуара, що нагрівається від пожежі в сусідньому резервуарі. Модель враховує променевий і конвекційний теплообмін з факелом і навколишнім середовищем, але питання охолодження резервуара не розглянуто.

В [15] визначено коефіцієнти конвекційної тепловіддачі від стінки резервуара до водної плівки, що стікає по ній, але розподіл температури по стінці резервуара і воді залишено без уваги. В [16] розглянуто динаміку зміни температури води і стінки при пожежі в обвалуванні резервуара, але неврахованим залишається променевий теплообмін водної плівки з навколишнім середовищем. В [17] розглядається охолодження резервуара за допомогою пожежних моніторів, побудовано рівняння теплового балансу для стінки резервуара і водної плівки, що утворюється при стіканні води. Але поза увагою залишено усталений розподіл температур, по якому доцільно визначати достатність інтенсивності подачі води на охолодження. В [18] за допомогою системи моделювання динаміки пожежі визначаються найбільш критичні зони резервуара, що потребують охолодження. Недолі-

ком такого підходу є неможливість узагальнення отриманих результатів на інші умови (вітер, розміри і розташування резервуарів).

Аналіз моделей теплового впливу пожежі нафтопродукту в резервуарі на сусідні резервуари засвідчив, що охолодження резервуарів водою при пожежі залишається недостатньо вивченим. Це, в свою чергу, може призводити до похибки в оцінці необхідної інтенсивності подачі води на охолодження стінок резервуарів.

Таким чином, невирішеною частиною проблеми розповсюдження пожежі на сусідні резервуари внаслідок теплового потоку на них є визначення охолоджувальної дії води, що стікає по стінці резервуара.

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є побудова моделі охолоджувальної дії водної плівки, що стікає по стінці вертикального сталевого резервуара, в умовах теплового впливу пожежі в сусідньому резервуару.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

– побудувати рівняння теплового балансу для стінки резервуара і визначити величину теплового потоку в водну плівку;

– побудувати модель нагріву водної плівки, що стікає по стінці резервуара;

– розробити алгоритм визначення розподілу температур по стінці резервуара і водній плівці на ній.

4. Матеріали та методи дослідження

Об’єктом дослідження є процес охолодження водною плівкою стінки вертикального сталевого резервуара в умовах пожежі нафтопродукту в аналогічному сусідньому резервуарі. Основна гіпотеза дослідження полягає в припущенні про рівномірний рух водної плівки по стінці резервуара. Для побудови оцінки коефіцієнта конвекційного теплообміну між стінкою резервуара і водною плівкою використано методи теорії подібності. Розв’язання рівняння теплового балансу проведено із застосуванням чисельних методів розв’язку диференціальних рівнянь в частинних похідних.

5. Побудова моделі охолоджувальної дії водної плівки на стінку резервуара при пожежі

5.1. Побудова рівняння теплового балансу для стінки резервуара

Розглянемо довільну точку на стінці резервуара, розташовану вищі рівня залитого в резервуара нафтопродукту. Зовнішня поверхня стінки нагрівається за рахунок теплового потоку випромінюванням від факела над сусіднім резервуаром (q_1), віддає тепло випромінюванням в навколишнє середовище (q_2) та конвекцією в оточуючу середу (повітря або водну плівку – q_3). Внутрішня поверхня стінки віддає тепло випромінюванням у внутрішній простір резервуара (q_4) та конвекційно в пароповітряну суміш (q_5). Розподіл температури в середині стінки описується одновимірним рівнянням теплопровідності (рис. 1) [14].

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a\frac{\partial^2 T}{\partial x^2},\ 0 < x < \delta_w,\ t > 0, \qquad (1)$$

де T(x,t) – температура всередині стінки резервуара на відстані x від її зовнішньої поверхні в момент часу t; δ_w – товщина стінки; a – коефіцієнт температуропровідності:

© М. В. Максименко

$$a = \frac{\lambda_w}{c_w \rho_w}, \tag{2}$$

де λ_w, c_w, ρ_w –теплопровідність, теплоємність і густина сталі відповідно. Наявність теплового потоку відповідає крайовій умові другого роду на зовнішній поверхні стінки:

$$\left.\frac{\partial T}{\partial x}\right|_{x=0} = -\frac{1}{\lambda_w}(q_1 - q_2 - q_3). \tag{3}$$

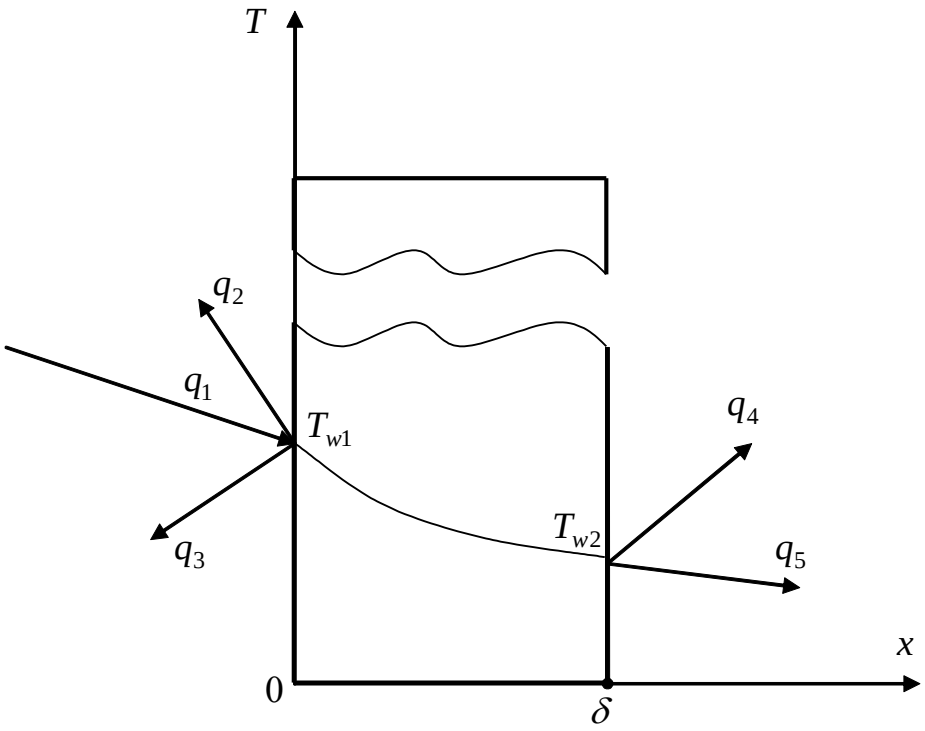

Рис. 1. Нагрів сухої стінки резервуара під тепловим впливом пожежі

На внутрішній стінці крайова умова буде мати вигляд:

$$\left.\frac{\partial T}{\partial x}\right|_{x=\delta} = -\frac{1}{\lambda_w}(q_4 + q_5). \tag{4}$$

В [14] показано, що крайова умова для зовнішньої поверхні стінки може бути представлена у вигляді:

$$\left.\frac{\partial T}{\partial x}\right|_{x=0} = -\frac{c_0 \varepsilon_f \varepsilon_w}{\lambda_w}\left[\left(\frac{T_f}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{out}}{100}\right)^4\right]\varphi + \frac{c_0 \varepsilon_w}{\lambda_w}\left[\left(\frac{T_{out}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_0}{100}\right)^4\right](1-\varphi) + \frac{\alpha_{out}}{\lambda_w}(T_{out} - T_0), \tag{5}$$

де c_0=5,67 Вт/(м^{2}К^4) – стала; ε_f, ε_w – ступіні чорноти випромінюючої поверхні фа-

кела і стінки резервуара відповідно; T_f – температура поверхні факела; T_{out} – температура зовнішньої поверхні стінки резервуара; φ – коефіцієнт взаємного опромінення між факелом і точкою на поверхні резервуара; T_0 – температура навколишнього середовища; α_{out} – коефіцієнт конвекційного теплообміну стінки з водною плівкою, що стікає по ній.

Для внутрішньої поверхні стінки резервуара крайова умова набуває вигляду: [14]:

$$\left.\frac{\partial T}{\partial x}\right|_{x=\delta} = -\frac{c_0 \varepsilon_w}{\lambda_w}\left[\left(\frac{T_{in}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_0}{100}\right)^4\right] - \frac{\alpha_{in}}{\lambda_w}\left(T_{in} - T_0\right), \tag{6}$$

де α_{in} – коефіцієнт конвекційного теплообміну внутрішньої поверхні стінки резервуара з пароповітряною сумішшю в його газовому просторі; T_{in} – температура на внутрішній поверхні стінки резервуара. При теплообміні стінки з пароповітряною сумішшю має місце режим вільної конвекції. В цьому випадку коефіцієнт конвекційного теплообміну може бути описаний виразом [14]:

$$\alpha_{in} = \left(15{,}904 - 0{,}0082\frac{T_{in} + T_0}{2}\right)\left(\frac{T_{in} - T_0}{T_{in} + T_0}\right)^{1/3}, \tag{7}$$

де температури задаються в градусах Кельвіна.

Коефіцієнт конвекційного теплообміну з водною плівкою, що стікає по зовнішній стінці резервуара описується виразом [15]:

$$\alpha_{out} = \left(238{,}53T_c - 45098\right)I^{0,25}, \tag{8}$$

де T_c – температура води; I – інтенсивність стікання води, $м^3/(м \cdot с)$.

Чисельне розв'язання рівняння (1) з крайовими умовами (5), (6) і значеннями коефіцієнтів конвекційного теплообміну (7), (8) дозволяє знайти усталений (при $t \to \infty$) розподіл температур всередині стінки резервуара. Зокрема, буде знайдене значення температури на зовнішній поверхні стінки резервуара:

$$T_{out}^{*} = \lim_{t \to \infty} T_{out}(t).$$

Це означає, що температура поверхні стінки резервуара збігається до певного граничного значення.

5.2. Побудова моделі нагріву водної плівки, що стікає по стінці резервуара

Розглянемо елементарний об'єм води у формі паралелепіпеда на стінці резервуара (рис. 2).

Будемо виходити за наступних припущень:

1. Водна плівка рівномірно рухається по стінці резервуара зі сталою швидкістю w.

2. Шар води є тонким, внаслідок чого вода є прозорою для теплового випромінювання від факелу до стінки резервуара і від стінки резервуара в навколишнє середовище.

© М. В. Максименко

3. Вода нагрівається внаслідок конвекційного теплообміну зі стінкою резервуара (тепловий потік q_6, рис. 2).

4. Вода віддає тепло в навколишнє середовище шляхом випромінювання (q_7, рис. 2) і конвекції (q_8, рис. 2).

5. Внаслідок турбулентного характеру стікання і інтенсивного перемішування температура води по товщині водної плівки є однаковою.

Нехай δ_w – товщина водної плівки; ΔS – площа основи елементарного об'єму води ΔV (рис. 2):

$$\Delta V = \delta \Delta S. \tag{9}$$

Тепловий потік від стінки резервуара внаслідок конвекційного теплообміну складає:

$$q_6 = \alpha_{out}\left(T^*_{out} - T_c\right). \tag{10}$$

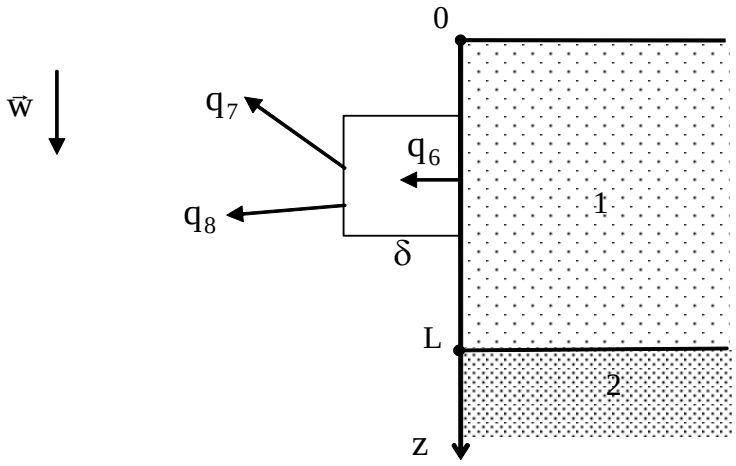

Рис. 2. Елементарний об'єм води на стінці резервуара: 1 – газовий простір резервуара; 2 – нафтопродукт

Тепловий потік випромінюванням від водної плівки в навколишнє середовище:

$$q_7 = c_0 \varepsilon_c \left(\left(\frac{T_c}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right), \tag{11}$$

де ε_c – ступінь чорноти поверхні води. Тепловий потік внаслідок конвекційного теплообміну з повітрям:

$$q_8 = \alpha_a \left(T_c - T_0 \right), \tag{12}$$

де α_a – коефіцієнт конвекційного теплообміну з повітрям. Таким чином, протягом часу Δt елементарний об'єм води отримає кількість тепла ΔQ:

$$\Delta Q = \left(q_6 - q_7 - q_8 \right) \Delta S \Delta t. \tag{13}$$

Отримане тепло йде на нагрів об'єму води ΔV на температуру ΔT:

$$\Delta Q = \Delta V \rho_c c_c \Delta T, \tag{14}$$

де ρ_c, c_c – густина і теплоємність води відповідно.

Прирівнюючи вирази (13) і (14), отримаємо:

$$(q_6 - q_7 - q_8)\Delta S \Delta t = \Delta V \rho_c c_c \Delta T. \tag{15}$$

Із врахуванням співвідношення (9) вираз (15) набуде вигляду:

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{q_6 - q_7 - q_8}{\delta \rho_c c_c}. \tag{16}$$

Переходячи до границі при $\Delta t \to \infty$ у виразі (16), отримаємо:

$$\frac{dT}{dt} = \lim_{\Delta t \to \infty} \frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{q_6 - q_7 - q_8}{\delta \rho_c c_c}. \tag{17}$$

Врахування рівномірного рух води по стінці:

$$dz = w dt, \tag{18}$$

дозволяє перетворити вираз (17) на:

$$\frac{dT_c}{dz} = \frac{q_6 - q_7 - q_8}{w \delta \rho_c c_c}. \tag{19}$$

Підстановка (10)–(12) у (19) дає:

$$\frac{dT_c}{dz} = \frac{1}{w \delta \rho_c c_c}\left[\alpha_{out}\left(T_{out}^* - T_c\right) - \alpha_a\left(T_c - T_0\right) - c_0 \varepsilon_c\left(\left(\frac{T_c}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_0}{100}\right)^4\right)\right]. \tag{20}$$

Відзначимо, що інтенсивність зрошення стінки дорівнює:

$$I = w\delta.$$

Тоді,

$$\frac{dT_c}{dz} = \frac{1}{I \rho_c c_c}\left[\alpha_{out}\left(T_{out}^* - T_c\right) - \alpha_a\left(T_c - T_0\right) - c_0 \varepsilon_c\left(\left(\frac{T_c}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_0}{100}\right)^4\right)\right], \tag{21}$$

де інтенсивність зрошення стінки задається в $м^3/(м \cdot с)$. Коефіцієнт конвекційного теплообміну зі стінкою α_{out} визначається співвідношенням (8). Величину коефіцієнта конвекційного теплообміну з повітрям оцінимо виходячи з того, що повітря рухається зі швидкістю w відносно води:

© М. В. Максименко

$$\mathrm{Nu} = 0{,}036\,\mathrm{Re}^{0{,}8}\,\mathrm{Pr}^{0{,}4}, \tag{22}$$

де Nu, Re, Pr – числа Нусельта, Рейнольда і Прандтля відповідно:

$$\mathrm{Nu} = \frac{\alpha_a L}{\lambda_a};\ \mathrm{Re} = \frac{wL}{\nu_a},$$

де L – характерний розмір; λ_a, ν_a – теплопровідність і кінематична в'язкість повітря відповідно. Тоді,

$$\frac{\alpha_a L}{\lambda_a} = 0{,}036\left(\frac{wL}{\nu_a}\right)^{0{,}8}\mathrm{Pr}^{0{,}4},$$

$$\alpha_a = 0{,}036\lambda_a\left(\frac{w}{\nu_a}\right)^{0{,}8} L^{-0{,}2}\,\mathrm{Pr}^{0{,}4}. \tag{23}$$

В [15] показано, що швидкість стікання водної плівки може бути апроксимована виразом:

$$w \cong 18{,}2 I^{0{,}4}. \tag{24}$$

де інтенсивність зрошення стінки виражена в $м^3/(м\cdot с)$. Тоді співвідношення (23) набуде вигляду:

$$\alpha_a = 0{,}367 L^{-0{,}2} I^{0{,}32}\lambda_a \nu_a^{-0{,}8}\,\mathrm{Pr}^{0{,}4}. \tag{25}$$

Коефіцієнт теплопровідності повітря λ_a, кінематична в'язкість ν_a і число Прандтля Pr залежать від температури повітря. На рис. 3 показано залежність:

$$f_a(T) = \lambda_a \nu_a^{-0{,}8}\,\mathrm{Pr}^{0{,}4},$$

та її лінійну апроксимацію у вигляді:

$$\tilde{f}_a(T) = -0{,}14T + 62{,}4, \tag{26}$$

де температура повітря T має бути задана в градусах Цельсія. Аналіз зображень на рис. 3 свідчить, що відносна похибка апроксимації (26) не перевищує 1,5 %. Тоді, підставляючи (26) у (25), отримаємо:

$$\alpha_a = 0{,}367 L^{-0{,}2} I^{0{,}32}\left(62{,}4 - 0{,}14T_0\right),$$

$$\alpha_a = L^{-0{,}2} I^{0{,}32}\left(22{,}9 - 0{,}052T_0\right), \tag{27}$$

де в якості характерного розміру L може бути обрано висоту стінки над рівнем нафтопродукту (рис. 2), а температуру повітря T_0 задано в градусах Цельсія.

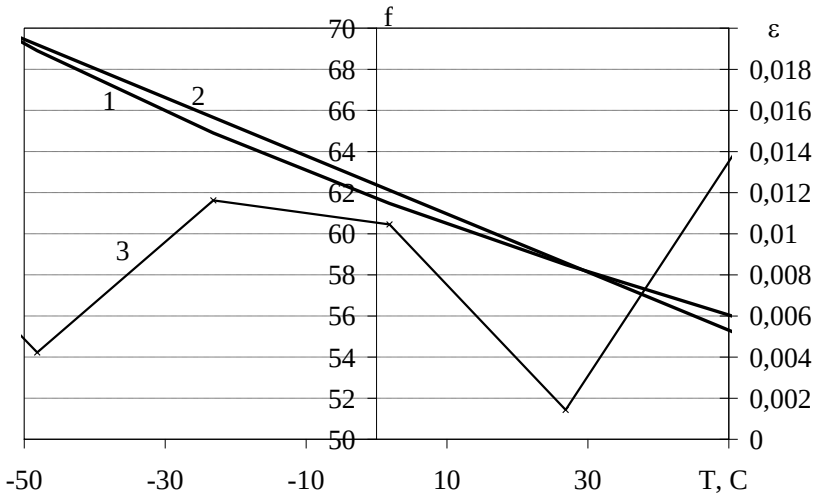

Рис. 3. Залежність функції f_a від температури навколишнього повітря (1), її лінійна апроксимація (2) і відносна похибка (3, по правій вісі)

Таким чином, вираз (21) після підстановки значень коефіцієнтів конвекційного теплообміну (8) і (27) описує зміну температури водної плівки у вертикальному напрямку в усталеному режимі.

5.3. Розробка алгоритму визначення розподілу температур по стінці резервуара і водній плівці

Оберемо в якості початку координат точку на верхньому краї стінки резервуара, а вісь OZ спрямуємо вниз (рис. 2). Частина стінки при z>L внутрішньою поверхнею торкається нафтопродукту, який має охолоджувальну дію. Це означає, що небезпека нагріву стінки до температури самоспалахування існує тільки для відрізку стінки 0≤z≤L. Тоді алгоритм розрахунку розподілу температури стінки і водної плівки на відрізку 0≤z≤L зводиться до наступних кроків.

1. Розбиваємо відрізок [0; L] точками z_0, z_1, …, z_n на n рівних відрізків $[z_i; z_{i+1}]$ довжиною Δz. При цьому $z_0=0$, $z_n=L$.

2. Обираємо гранично припустимі значення температури водної плівки $T_{c\,max}$ і стінки резервуара $T_{out\,max}$. При цьому мають виконуватися умови:

$$T_{c\,max} < 100\,^{o}\mathrm{C};$$
$$T_{out\,max} < T^{*},$$

де T^{*} – температура самоспалахування парів нафтопродукту.

3. Початкова температура водної плівки на верхньому краї стінки резервуара дорівнює температурі навколишнього середовища:

$$T_c(0) = T_0.$$

4. Нехай i=0.

5. Для точки z_i розраховуємо усталену температуру зовнішньої поверхні стінки $T^{*}_{out}(z_i)$, розв'язуючи для цього одновимірне рівняння теплопровідності (1) з крайовими умовами (5) і (6), коефіцієнти конвекційного теплообміну для яких визначаються за формулами (7) і (8).

© М. В. Максименко

6. Обчислюємо приріст температури водної плівки у точці z_i:

$$\Delta T_c(z_i) = \frac{\Delta z}{I\rho_c c_c}\left[\alpha_{out}\left(T^*_{out} - T_c\right) - \alpha_a\left(T_c - T_0\right) - c_0\varepsilon_c\left(\left(\frac{T_c}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_0}{100}\right)^4\right)\right], \quad (28)$$

де коефіцієнти конвекційного теплообміну визначаються за формулами (8) і (27).

7. Обчислюємо температуру водної плівки у наступній точці:

$$T_c(z_{i+1}) = T_c(z_i) + \Delta T_c(z_i).$$

8. Якщо i<n, то покладаємо i = i+1 та переходимо до кроку 5.

9. Якщо для кожної точки z_i, $0 \le i \le n$, виконано умови:

$$T^*_{out}(z_i) \le T_{out\,max}; \quad (29)$$

$$T_c(z_i) \le T_{c\,max}, \quad (30)$$

то інтенсивність охолодження стінки є достатньою, небезпеки досягнення стінкою температури самоспалахування парів нафтопродуктів немає.

6. Обговорення результатів побудови моделі охолоджувальної дії водної плівки

Рівняння теплового балансу для стінки резервуара при охолодженні її водою в умовах пожежі в сусідньому резервуарі враховує:

– променевий теплообмін зовнішньої поверхні стінки резервуара з факелом і навколишнім середовищем;

– променевий теплообмін внутрішньої поверхні стінки з внутрішнім простором резервуара;

– теплообмін в режимі вимушеної конвекції з водною плівкою що стікає по стінці резервуара;

– теплообмін з пароповітряною сумішшю в режимі вільної конвекції.

Стікаюча по стінці вода є основним чинником її охолодження і запобігання того, що температура стінки може досягти небезпечних значень. Згідно (8) при температурі води T_c=20 ºС та інтенсивності її подачі I=(0,5÷2,0) л/(м·с) коефіцієнт конвекційного теплообміну між стінкою і водною плівкою складає α_{out}=(3,7÷5,2) кВт/(м^2·К). Це на 3 порядки перевищує типові значення коефіцієнта конвекційного теплообміну внутрішньої поверхні стінки з пароповітряною сумішшю: α_{in}=(6,5÷8,5) Вт/(м^2·К) при температурі стінки T_{in}=(100÷300) ºС – вираз (7).

Рівняння (1) разом з крайовими умовами (5) і (6), що відповідають умовам теплообміну, визначає динаміку зміну розподілу температури в стінці резервуара. Застосування метода скінчених різниць до (1), (5), (6) дозволяє знайти усталений розподіл температур в стінці резервуара, як граничний розподіл при t→∞. Використання метода скінчених різниць вимагає завдання початкової умови, в якості якої може бути обрана умова T=T_0.

Відбір водою тепла від стінки резервуара призводить до нагріву води. Нагрів

води до температури кипіння призведе до її скипання на поверхні стінки і відштовхування водної плівки від стінки. Це різко знижує охолоджуючий ефект. Тому важливим є не лише контроль температури стінки, а й температури води, що стікає по ній.

Основним припущенням при побудові моделі нагріву водної плівки при її стіканні по стінці резервуара є припущення про сталу швидкість стікання. Із (24) випливає, що при інтенсивності подачі води I=(0,5÷2,0) л/(м·с) швидкість стікання складає w=(0,87÷1,5) м/с. Модель враховує конвекційний теплообмін зі стінкою резервуара і навколишнім повітрям. Мала товщина шару води (δ_c=(0,6÷1,3) мм) дозволяє вважати його повністю прозорим для теплового випромінювання пожежі, що нагріває стінку резервуара.

Коефіцієнт конвекційного теплообміну водної плівки з навколишнім повітрям оцінено за допомогою методів теорії подібності. Його величина становить α_a=(1,3÷2,1) Вт/(м^2·К) при температурі води T_c=(20÷90) ºС, повітря T_0=20 ºС і висоті стінки над рівнем нафтопродукту L=6 м.

Рівняння теплового балансу для водної плівки (13–14) дозволяє отримати вираз (21), що описує градієнт температури водної плівки по висоті стінки резервуара.

Розв'язання рівняння розподілу температури всередині стінки резервуара (1), (5), (6) разом з градієнтом температури у водній плівці (21) дозволяють побудувати алгоритм розрахунку температури стінки і водної плівки в умовах пожежі в сусідньому резервуарі. Суть алгоритму полягає в послідовному обчисленні усталеного значення температури стінки і приросту температури водної плівки в точках, розташованих вертикально на стінці резервуара з певним кроком Δz. Алгоритм починає роботу з точки на верхньому краї стінки резервуара і закінчує у точці на рівні нафтопродукту. В якості максимально припустимих значень температури стінки і водної плівки в (29), (30) доцільно обирати значення нижчі за температуру самоспалахування і кипіння води відповідно.

Обмеженням побудованої моделі є те, що вона виходить із сталої швидкості стікання води по стінці резервуара і однакової товщини водної плівки.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з визначенням інтенсивності подачі води на охолодження в залежності від типу нафтопродукту в резервуарі і погодних умов (напрямку і швидкості вітру).

7. Висновки

1. Побудовано рівняння теплового балансу для стінки резервуара з нафтопродуктом при охолодженні її водою в умовах пожежі в сусідньому резервуарі. Рівняння враховує променевий теплообмін стінки з факелом, навколишнім середовищем і внутрішнім простором резервуара; конвекційний теплообмін з водною плівкою і пароповітряною сумішшю в газовому просторі резервуара. Показано, що стікаюча по стінці вода є основним чинником її охолодження. При інтенсивності подачі води 0,5÷2,0 л/(м·с) коефіцієнт конвекційного теплообміну між стінкою і водною плівкою складає 3,7÷5,2 кВт/(м^2·К), що на 3 порядки перевищує коефіцієнт теплообміну з пароповітряною сумішшю або навколишнім повітрям.

2. Побудовано модель нагріву водної плівки, що стікає по стінці резервуара, що нагрівається під тепловим впливом пожежі в сусідньому резервуарі. Модель спирається на припущення про сталу швидкість стікання води по стінці резервуара, яка при інтенсивності зрошення 0,5÷2,0 л/(м·с) складає 0,87÷1,5 м/с. Модель враховує конвекційний теплообмін зі стінкою резервуара і навколишнім повіт-

© М. В. Максименко

рям, а також променевий теплообмін з навколишнім середовищем. Для визначення коефіцієнтів конвекційного теплообміну використано методи теорії подібності. Показано, що в усталеному режимі у вертикальному напрямку виникає градієнт температур у стінці і водній плівці.

3. Побудовано алгоритм визначення розподілу температур в стінці резервуара і водній плівці, що стікає по ній. Алгоритм спирається на рівняння теплового балансу стінки резервуара і модель нагріву водної плівки. Для розв'язання рівняння теплового балансу стінки використовується метод скінчених різниць. Суть алгоритму полягає в послідовному обчисленні усталеного значення температури стінки і приросту температури водної плівки в точках, розташованих вздовж вертикалі на стінці резервуара з певним кроком. Алгоритм починає роботу з точки на верхньому краї стінки резервуара і закінчує у точці на рівні нафтопродукту.

Література

1. Yang R., Wang Z., Jiang J., Shen S, Sun P., Lu Y. Cause analysis and prevention measures of fire and explosion caused by sulfur corrosion. Engineering Failure Analysis. 2020. Vol. 108. P. 104342. doi: 10.1016/j.engfailanal.2019.104342

2. Ni Z., Wang Y. Relative risk model for assessing domino effect in chemical process industry. Safety Science. 2016. Vol. 87. P. 156–166. doi: 10.1016/j.ssci.2016.03.026

3. Otrosh Yu., Semkiv O., Rybka E., Kovalov A. About need of calculations for the steel framework building in temperature influences conditions. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 708(1). doi: 10.1088/1757-899X/708/1/012065

4. 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. Chemistry and Chemical Technology Issues. 2019. Vol. 1. P. 92–99. doi: 10.32434/0321-4095-2019-122-1-92-99

5. Mygalenko K., Nuyanzin V., Zemlianskyi A., Dominik A., Pozdieiev S. Development of the technique for restricting the propagation of fire in natural peat ecosystems. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 1(10). P. 31–37. doi: 10.15587/1729-4061.2018.121727

6. Popov O., Iatsyshyn A., Kovach V., Artemchuk V., Kameneva I., Taraduda D., Sobyna V., Sokolov D., Dement M., Yatsyshyn T. Risk assessment for the population of Kyiv, Ukraine as a result of atmospheric air pollution. Journal of Health and Population. 2020. Vol. 10(25). doi: 10.5696/2156-9614-10.25.200303

7. Mukunda H. S., Shivakumar A., Bhaskar Dixit C. S. Modelling of unsteady pool fires – fuel depth and pan wall effects. Combustion Theory and Modelling. 2021. doi: 10.1080/13647830.2021.1980229

8. Elhelw M., El-Shobaky A., Attia A., El-Maghlany W. M. Advanced dynamic modeling study of fire and smoke of crude oil storage tanks. Process Safety and Environmental Protection. 2021. Vol. 146. P. 670–685. doi: 10.1016/j.psep.2020.12.002

9. Semerak M., Pozdeev S., Yakovchuk R., Nekora O., Sviatkevich O. Mathematical modeling of thermal fire effect on tanks with oil products. MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 247(00040). doi: 10.1051/matecconf/201824700040

10. Espinosa S. N., Jaca R. C., Godoy L. A. Thermal effects of fire on a nearby fuel storage tank. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2019. Vol. 62(103990). doi:10.1016/j.jlp.2019.103990

11. Li Y., Jiang J., Zhang Q., Yu Y., Wang Z., Liu H., Shu C.-M. Static and dynamic flame model effects on thermal buckling: Fixed-roof tanks adjacent to an ethanol pool-fire. Process Safety and Environmental Protection. 2019. Vol. 127. P. 23–35. doi: 10.1016/j.psep.2019.05.001

12. Ahmadi O., Mortazavi S. B., Pasdarshahri H., Mohabadi H. A. Consequence analysis of large-scale pool fire in oil storage terminal based on computational fluid dynamic (CFD). Process Safety and Environmental Protection. 2019. Vol. 123. P. 379–389. doi: 10.1016/j.psep.2019.01.006

13. Abramov Y. A., Basmanov O. E., Mikhayluk A. A., Salamov J. Model of thermal effect of fire within a dike on the oil tank. Naukovyi Visnyk NHU. 2018. Vol. 2. P. 95–100. doi: 10.29202/nvngu/2018-2/12

14. Басманов О. Є., Максименко М. В. Моделювання впливу пожежі на сусідній резервуар з нафтопродуктом в умовах вітру. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2022. № 1(35). С. 239–253. doi: 10.52363/2524-0226-2022-35-18

15. Basmanov O., Kulik Y. Estimation of the convection heat exchange rate for tank shells covered with falling water film. East journal of security studies. 2017. Vol. 1. P. 145–154. URL: http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/6121

16. Саламов Д. О., Абрамов Ю. О., Басманов О. Є. Алгоритм розрахунку охолоджувальної дії водної плівки, що стікає по стінці резервуара. Проблеми пожежної безпеки. 2019. № 46. С. 174–178. URL: http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/11119

17. 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, Ecology. 2019. 1/10(97). P. 14–20. doi: 10.15587/1729-4061.2019.154669

18. Elhelw M., El-Shobaky A., Attia A., El-Maghlany W. M. Advanced dynamic modeling study of fire and smoke of crude oil storage tanks. Process Safety and Environmental Protection. 2021. Vol. 46. P. 670–685. doi: 10.1016/j.psep.2020.12.002

M. Maksymenko, *Adjunct*
National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

A MODEL OF COOLING THE TANK SHELL BY WATER IN THE CASE OF A FIRE IN AN ADJACENT TANK

Cooling the tank shell by water in the case of a fire in an adjacent tank is considered. A model of the cooling effect of the water film flowing down on the tank shell was constructed. The model is based on the heat balance equation for the tank shell and the heat balance equation for the water film. The model takes into account the radiant heat exchange of the shell and fire, environment and internal space of the tank; convection heat exchange of the shell with water and steam-air mixture in the gas space of the tank. In addition, the heat balance equation for the water film includes radiant heat transfer to the environment and convective heat transfer to the ambient air. The main assumption of the model is constant water flow rate and a constant thickness of the water film on the wall. The finite difference method was used to solve the heat balance equations of the shell and the water film. The values of convection heat transfer coefficients were found by using methods of similarity theory. The coefficient of convection heat transfer between the wall and water film has a linear dependence on the water temperature and a power dependence on the intensity of water supply. It was determined that coefficient of convection heat transfer between the tank wall and the water film is 3 orders of magnitude higher than the coefficient of convection heat transfer between the shell and ambient air. It is shown that the temperature distribution in the tank shell and the water film converges to the stationary distribution. The combination of heat balance equations for the shell and water film allows building an algorithm for detrmining the

© М. В. Максименко

temperatures on the tank shell and water film. The algorithm is based on the sequential calculation of the steady-state value of the shell temperature and the growth the temperature of the water film at points located along the vertical line on the tank shell. The algorithm starts working from the point on the upper edge of the tank shell and ends at the point at the level of the oil product. The obtained results can be used for determining the intensity of water supply for cooling the tank shell in the case of fire in an adjacent tank.

Keywords: tank fire, thermal influence of fire, heat transfer, water cooling

References

1. Ni, Z., Wang, Y. (2016). Relative risk model for assessing domino effect in chemical process industry. Safety Science, 87, 156–166. doi: 10.1016/j.ssci.2016.03.026

2. Otrosh, Yu., Semkiv, O., Rybka, E., Kovalov, A. (2019). About need of calculations for the steel framework building in temperature influences conditions. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 708(1). doi: 10.1088/1757-899X/708/1/012065

3. Yang, R., Wang, Z., Jiang, J., Shen, S, Sun, P., Lu, Y. (2020). Cause analysis and prevention measures of fire and explosion caused by sulfur corrosion. Engineering Failure Analysis, 108, 104342. doi: 10.1016/j.engfailanal.2019.104342

4. 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. Chemistry and Chemical Technology Issues, 1, 92–99. doi: 10.32434/0321-4095-2019-122-1-92-99

5. Mygalenko, K., Nuyanzin, V., Zemlianskyi, A., Dominik, A., Pozdieiev, S. (2018). Development of the technique for restricting the propagation of fire in natural peat ecosystems. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1 (10), 31–37. doi: 10.15587/1729-4061.2018.121727

6. Popov, O., Iatsyshyn, A., Kovach, V., Artemchuk, V., Kameneva, I., Taraduda, D., Sobyna, V., Sokolov, D., Dement, M., Yatsyshyn, T. (2020). Risk assessment for the population of Kyiv, Ukraine as a result of atmospheric air pollution. Journal of Health and Population, 10(25). doi: 10.5696/2156-9614-10.25.200303

7. Mukunda, H. S., Shivakumar, A., Bhaskar Dixit, C. S. (2021). Modelling of unsteady pool fires – fuel depth and pan wall effects. Combustion Theory and Modelling. doi: 10.1080/13647830.2021.1980229

8. Elhelw, M., El-Shobaky, A., Attia, A, El-Maghlany, W. M. (2021). Advanced dynamic modeling study of fire and smoke of crude oil storage tanks. Process Safety and Environmental Protection, 146, 670–685. doi: 10.1016/j.psep.2020.12.002

9. Semerak, M., Pozdeev, S., Yakovchuk, R., Nekora, O., Sviatkevich, O. (2018). Mathematical modeling of thermal fire effect on tanks with oil products. MATEC Web of Conferences, 247(00040). doi: 10.1051/matecconf/201824700040

10. Espinosa S. N., Jaca R. C., Godoy L. A. (2019). Thermal effects of fire on a nearby fuel storage tank. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 62(103990). doi: 10.1016/j.jlp.2019.103990

11. Li, Y., Jiang, J., Zhang, Q., Yu, Y., Wang, Z., Liu, H., Shu, C.-M. (2019). Static and dynamic flame model effects on thermal buckling: Fixed-roof tanks adjacent to an ethanol pool-fire. Process Safety and Environmental Protection, 127, 23–35. doi: 10.1016/j.psep.2019.05.001

12. Ahmadi, O., Mortazavi, S. B., Pasdarshahri, H., Mohabadi, H. A. (2019). Consequence analysis of large-scale pool fire in oil storage terminal based on computational

fluid dynamic (CFD). Process Safety and Environmental Protection, 123, 379–389. doi: 10.1016/j.psep.2019.01.006

13. Abramov, Y. A., Basmanov, O. E., Mikhayluk, A. A., Salamov, J. (2018). Model of thermal effect of fire within a dike on the oil tank. Naukovyi Visnyk NHU, 2, 95–100. doi: 10.29202/nvngu/2018-2/12

14. Basmanov, O., Maksymenko, M. (2022). Modeling the thermal effect of fire to the adjacent tank in the presence of wind. Problems of Emergency Situations, 1(35), 239–253. doi: 10.52363/2524-0226-2022-35-18

15. Basmanov, O., Kulik Y. (2017). Estimation of the convection heat exchange rate for tank shells covered with falling water film. East journal of security studies, 1, 145–154. Available at: http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/6121

16. Salamov, J., Abramov, Y., Basmanov, O. (2019). Algorithm of determining the cooling effect of the water film flowing along the tank shell. Problems of fire safety, 46, 174–178. Available at: http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/11119

17. 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, Ecology, 1/10(97), 14–20. doi: 10.15587/1729-4061.2019.154669

18. Elhelw, M., El-Shobaky, A., Attia, A., El-Maghlany, W. M. (2021). Advanced dynamic modeling study of fire and smoke of crude oil storage tanks. Process Safety and Environmental Protection, 46, 670–685. doi: 10.1016/j.psep.2020.12.002

Надійшла до редколегії: 09.03.2023
Прийнята до друку: 10.04.2023

© М. В. Максименко