

**МОДЕЛЮВАННЯ ПОЖЕЖІ В ОБВАЛУВАННІ РЕЗЕРВУАРА З
НАФТОПРОДУКТОМ**

Шифр __розлив__.

Харків 2017

ЗМІСТ

ВСТУП	3
1. АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ В РЕЗЕРВУАРНИХ ПАРКАХ	5
1.1. Класифікація нафтопродуктів	5
1.2. Статистика пожеж в резервуарних парках	6
1.3. Особливості пожеж в резервуарних парках та їх гасіння	6
2. МОДЕЛЮВАННЯ РОЗЛИВУ НАФТОПРОДУКТІВ	9
2.1. Математична модель розтікання рідини по горизонтальній поверхні	9
2.2. Особливості розтікання рідини по нерівній поверхні	17
3. ТЕПЛОВИЙ ВПЛИВ ПОЖЕЖІ НА РЕЗЕРВУАР З НАФТОПРОДУКТОМ	20
3.1. Модель теплового впливу пожежі розливу горючої рідини на резервуар з нафтопродуктом	20
3.2. Оцінка швидкості висхідних потоків над розливом, що горить	25
ВИСНОВКИ	30
ЛІТЕРАТУРА	31

ВСТУП

Актуальність теми. Резервуарні парки є основним місцем зберігання сирої нафти і нафтопродуктів на нафтопереробних заводах, перевалочних і розподільних нафтобазах, підприємствах автомобільного, залізничного, водного, повітряного транспорту. Скупчення легкозаймистих і горючих рідин на відносно невеликій площі резервуарного парку приводить до підвищеної пожежної небезпеки таких об'єктів. Розлив і займання нафтопродукту є однією з найнебезпечніших надзвичайних ситуацій, здатних привести не лише до значних матеріальних втрат, а й до людських жертв. Ситуація ускладнюється й економічно обумовленою тенденцією переходу до резервуарів більшого об'єму, що призводить до збільшення об'єму горючих рідин, який припадає на одиницю площі. Це, у свою чергу, підвищує небезпеку поширення пожежі на сусідні резервуари у разі відсутності своєчасної локалізації і ліквідації осередку горіння.

Проектування резервуарних парків, заходи пожежної безпеки, дії підрозділів ДСНС по локалізації і ліквідації пожежі регламентуються рядом нормативних документів. Але, незважаючи на заходи, що приймаються, кількість пожеж за останні 30 років залишається практично незмінною: протягом року на території СНД відбувається в середньому 12 великих пожеж. З них в Україні – 2 пожежі в 3 роки. При цьому кожна четверта пожежа закінчується повним вигоранням нафтопродукту.

З огляду на зазначену тенденцію до укрупнення резервуарів, ріст споживання нафти і нафтопродуктів в Україні (близько 5% щорічно) і взагалі у світі (близько 2% щорічно), така ситуація буде тільки ускладнюватися.

Таким чином, оцінка теплового впливу пожежі в обвалуванні на резервуар з нафтопродуктом є актуальною задачею.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є побудова моделі впливу пожежі в обвалуванні на резервуар з нафтопродуктом.

Об'єктом дослідження є процес розтікання і горіння горючих рідин на горизонтальній поверхні.

Предметом дослідження є тепловий вплив пожежі в обвалуванні на резервуар з нафтопродуктом.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблені моделі є основою для побудови системи підтримки ухвалення рішення керівником гасіння пожежі. Вони можуть бути використані при розробці оперативних планів пожежегасіння під час штабних навчань, розробці планів локалізації і ліквідації пожежі в бойовій обстановці, моніторингу надзвичайної ситуації в ході локалізації і ліквідації пожежі.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ В РЕЗЕРВУАРНИХ ПАРКАХ

1.1. Класифікація нафтопродуктів

Нафта – горюча корисна копалина, складна суміш вуглеводнів різних класів з невеликою кількістю органічних кисневих, сірчистих і азотних сполук, що являє собою густу оліїсту рідину [2, 3]. Забарвлення в неї червоно-коричнєве, буває жовто-зелене і чорне, іноді зустрічається безбарвна нафта. Нафта має характерний запах, легша за воду, у воді нерозчинна.

За складом дистилятної частини нафти ділять на п'ять класів:

- метанова;
- метано-нафтенова;
- нафтенова;
- метано-нафтенно-ароматична;
- нафтенно-ароматична.

У хімічному відношенні нафта – складна суміш вуглеводнів і вуглецевих сполук. Вона складається з таких елементів: вуглець (84-87%), водень (12-14%), кисень, азот, сірка (1-2%). Зміст сірки може становити близько 3-5%.

Властивості нафти визначають напрям її і впливають на продукти, отримуваних з нафти, тому є різні види класифікації, що відбивають хімічну природу нафти визначають можливі напрями переробки.

Наприклад, основою класифікації, що відбиває хімічний склад, належить переважне вміст у нафти будь-якого однієї чи кількох класів вуглеводнів. Розрізняють нафтові, парафінові, парафіно-нафтові, парафіно-нафтенно-ароматичні, нафтенно-ароматичні, ароматичні. В парафіновій нафті всі фракції містять значну кількість алканів; в парафіно-нафтенно-ароматичних вуглеводні всіх трьох класів містяться приблизно рівних кількостях; нафтенно-ароматичні

нафти характеризуються переважним змістом циклоалканів і аренів, особливо у важких фракціях.

1.2. Статистика пожеж в резервуарних парках

Пожежі нафти і нафтопродуктів у резервуарах, як правило, є складними і масштабними, ліквідуються з великими труднощами, наносять велику шкоду і часто приводять до загибелі людей. Як свідчить статистика, в США в резервуарних парках щорічно виникає 20 пожеж, у Японії щорічно виникає по одній пожежі [4, 5, 13]. Статистика свідчить про такий розподіл пожеж: на об'єктах «Головтранснафти» – 9,7%, на нафтопромислах – 14,2%, на нафтопереробних заводах – 28,4%, на розподільних нафтобазах – 47,7% [2, 8]. В наземних резервуарах сталося 93,4% пожеж, причому 32,1% з них мали місце в резервуарах з сировою нафтою, 53,9% – в резервуарах з бензином, 14,0% – в резервуарах з іншими нафтопродуктами (мазут, гас тощо). Пожежі відбувалися в основному у вертикальних сталевих резервуарах (227 випадків), з них 198 випадків (87,2 %) припадають на резервуари з бензином та сировою нафтою [1, 2].

1.3. Особливості пожеж в резервуарних парках та їх гасіння

Бойові дії пожежних підрозділів з гасіння пожеж у резервуарному парку (резервуарі) збереження нафти та нафтопродуктів повинні бути організовані з урахуванням обстановки, що склалася, рекомендацій та вказівок оперативного плану гасіння пожежі на даному об'єкті. При цьому керівник гасіння пожежі (КГП) у першу чергу зобов'язаний [1, 18]:

1. Провести розвідку пожежі.
2. негайно організувати потрібне охолодження резервуара, що горить, і сусіднього з ним.
3. Організувати підготовку пінної атаки.

4. Створити на місці пожежі оперативний штаб гасіння пожежі з обов'язковим включенням до його складу представників адміністрації та інженерно-технічного персоналу об'єкта.
5. Особисто і з допомогою спеціально призначених працівників об'єкта та пожежної охорони вжити заходів з дотримання необхідних вимог техніки безпеки.

Якщо пожежа сталася в результаті вибуху, одночасно з розвідкою осередків пожежі необхідно проводити розвідку об'єктів та резервуарів, що не горять, з метою визначення ступеню їх пошкодження та своєчасного вживання заходів з попередження можливого розповсюдження пожежі.

Для гасіння пожеж в резервуарних парках за допомогою пересувної пожежної техніки та напівстаціонарних систем застосовують: воду у вигляді розпилених струменів; вогнегасні порошки та інертні гази; перемішування горючої рідини; повітряно-механічну піну середньої і низької кратності.

В якості основного засобу гасіння пожеж нафти та нафтопродуктів у резервуарах застосовують вогнегасні піни середньої і низької кратності. Повітряно-механічна піна середньої кратності є основним засобом гасіння ЛЗР та ГР, піна низької кратності допускається для гасіння пожеж у резервуарах, обладнаних установками УППС (крізь шар пального).

Першочерговими діями підрозділів під час гасіння пожеж в резервуарах є подача водяних стволів для охолодження резервуара, що горить, і сусіднього, захист дихальної та іншої арматури сусідніх резервуарів. Перші стволи подаються, як правило, для охолодження резервуара, що горить, потім для охолодження та захисту усіх сусідніх резервуарів, які знаходяться від резервуара, що горить, до двох нормативних відстаней. Охолоджують резервуари безперервно до ліквідації пожежі та повного їх вистигання.

Гасіння пожеж у резервуарних парках з ЛЗР і ГР починається, як правило, з дій із захисту струменями води резервуарів, комунікацій, споруд від полум'я, запобігання горіння газозрівняльною системою, каналізаційними та

технологічними лотками, припинення виходу рідини з ємкості та обмеження площі її розтікання [18, 19].

У першу чергу захищають резервуар, що горить, та сусідні з ним, які піддаються безпосередній дії полум'я. Захист же металевих резервуарів, розташованих з боків з навітряної сторони резервуару, що горить, здійснюють у другу чергу. Сусідні резервуари захищають шляхом охолодження їх струменями води, закриттям арматури на резервуарі кошмами та брезентом. Арматуру, що розташована на землі, засипають піском, закривають кошмами, щитами та періодично зволожують водою.

Для охолодження резервуарів необхідно використовувати, як правило, стволи А. Можуть бути використані лафетні стволи ПЛС-20П із сприском 25 мм (особливо під час загрози закипання або викиду, а також для захисту арматури на покриттях сусідніх підземних резервуарів). Під час горіння рідини в обвалуванні інтенсивність охолодження резервуарів збільшується до 1 л/с на метр довжини кола резервуара, який знаходиться у зоні безпосередньої дії полум'я і здійснюється, головним чином, із лафетних стволів.

РОЗДІЛ 2

МОДЕЛЮВАННЯ РОЗЛИВУ НАФТОПРОДУКТІВ

2.1. Математична модель розтікання рідини по горизонтальній поверхні

Побудуємо математичну модель гравітаційного розтікання циліндричного шару рідини на горизонтальній поверхні, що враховує вплив сил тертя і сил поверхневого натягу [12].

Принцип розрахунку гравітаційного розтікання циліндричного шару рідини наведено на рис. 2.1 [9].

У початковий момент часу $t=0$ рідина є циліндром висотою h_0 і радіусом R_0 . Під дією сили тяжіння рідина розтікається, зберігаючи у будь-який момент часу форму циліндра з радіусом $R(t) \geq R_0$ і висотою $h(t) \leq h_0$ (рис. 2.1).

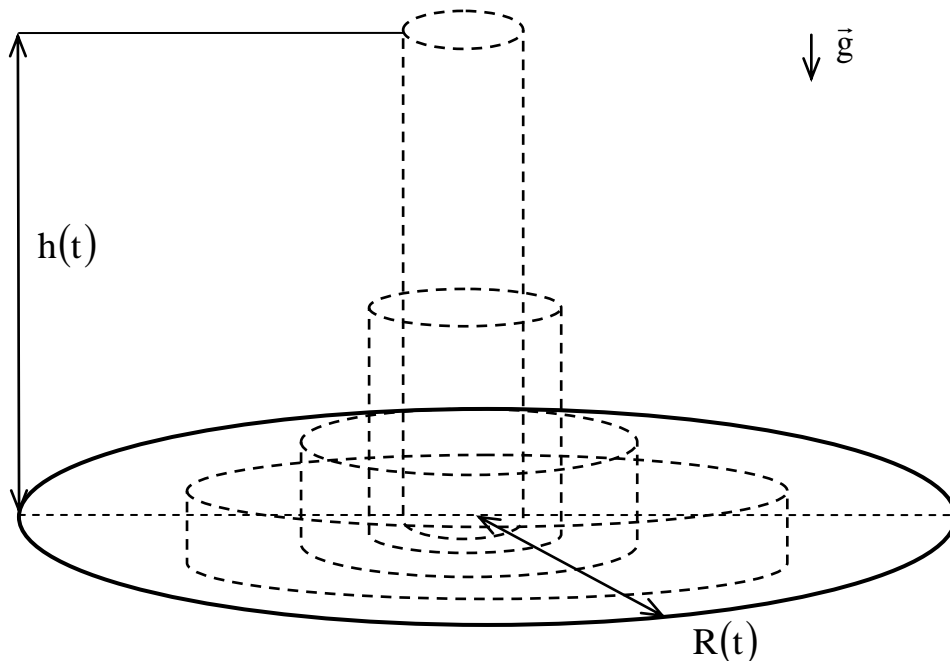


Рис. 2.1. Принцип розрахунку гравітаційного розтікання циліндрового шару рідини

Розтікання циліндрового шару відбувається внаслідок того, що на бічну поверхню кожного сегменту циліндра діє сила тиску

$$F_{\partial} = \int_0^h 2\pi R p(z) dz,$$

де $p(z)$ – тиск на глибині z : $p(z) = \rho g z$; g – прискорення сили тяжіння; ρ – густина рідини. Тоді

$$F_{\partial} = \pi R \rho g h^2. \quad (2.1)$$

Розтіканню рідини перешкоджає сила поверхневого натягу

$$F_{нат} = 2\pi R \sigma, \quad (2.2)$$

де σ – коефіцієнт поверхневого натягу рідини. Розтікання циліндричного шару на гладкій горизонтальній поверхні припиняється, коли сили (2.1) і (2.2) врівноважують одна одну: $\pi R \rho g h^2 = 2\pi R \sigma$.

Таким чином, розтікання рідини припиняється після досягнення її шаром товщини h_{\min}

$$h_{\min} = \sqrt{\frac{2\sigma}{\rho g}}, \quad R_{\max} = \sqrt[4]{\frac{V^2 \rho g}{2\pi^2 \sigma}}. \quad (2.3)$$

Розглянемо тепер розтікання рідини з ємкості, вважаючи, що об'ємна витрата рідини, що витікає з ємності, визначається залежністю

$$v = v(t). \quad (2.4)$$

Тоді об'єм і маса рідини, що розлилася, дорівнюють, відповідно

$$V(t) = \int_0^t v(\tau) d\tau, \quad m(t) = \rho \int_0^t v(\tau) d\tau. \quad (2.5)$$

Перетворюючи формулу (2.1), отримаємо

$$F_0 = \pi R \rho g h^2 = \pi R \rho g \left(\frac{V}{\pi R^2} \right)^2 = \pi R \rho g \frac{V^2}{\pi^2 R^4} = \frac{\rho g V^2(t)}{\pi R^3}. \quad (2.6)$$

Під час руху рідини виникає сила в'язкого тертя, величину якої оцінимо із співвідношення

$$F_{mp} = \xi_{mp} \frac{\rho w^2}{2} S, \quad (2.7)$$

де ξ_{mp} – коефіцієнт тертя; w – швидкість руху рідини в горизонтальному напрямі; S – площа зіткнення: $S = \pi R^2$. Коефіцієнт тертя визначимо з формули Прандтля-Шліхтінга:

$$\xi_{mp} = 0,455(\lg \text{Re})^{-2,58}, \quad (2.8)$$

де Re – число Рейнольдса:

$$\text{Re} = wL/\nu, \quad (2.9)$$

L – характерний розмір; ν – кінематична в'язкість рідини (m^2/c). Вважаючи характерний розмір рівним радіусу розливу і об'єднуючи (2.7)-(2.9), отримаємо

$$F_{mp}(R) = 0,455 \left(\lg \frac{wR}{\nu} \right)^{-2,58} \frac{\rho w^2}{2} \pi R^2. \quad (2.10)$$

Оскільки кромка рідини рухається з швидкістю $w_\kappa = R'$, то з припущення про постійну товщину шару виходить, що на відстані r від центру розливу ($r \leq R$) швидкість руху рівна $w(r) = w_\kappa R/r$. Тоді середня швидкість рівна

$$w = \frac{1}{\pi R^2} \iint_{S_p} w(r) ds = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^{2\pi} \int_0^R w(r) r dr d\varphi = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^{2\pi} \int_0^R w_\kappa R dr d\varphi = 2w_\kappa = 2R'.$$

$$\text{Тоді, } F_{mp}(R) = 0,455 \left(\lg \frac{2RR'}{\nu} \right)^{-2,58} 2\rho(R')^2 \pi R^2.$$

Модифікуємо отриману формулу так, щоб що сила тертя була направлена протилежно напрямку руху:

$$F_{mp}(R) = -0,455 \left(\lg \frac{R|R'|}{2\nu} \right)^{-2,58} 2\rho|R'|R' \pi R^2, \quad (2.11)$$

Крім того, рух рідини сповільнюватиметься за рахунок дисипації кінетичної енергії турбулентного руху. Оцінимо її вклад. Щільність кінетичної енергії турбулентного руху $k = \frac{W_m}{m}$, де W_m – кінетична енергія турбулентного руху, пов'язана з кінетичною енергією співвідношенням $W_m = c_1^2 W_\kappa^2$, де c_1 – емпірична константа, що має порядок 0,25 для струминних течій. Тоді об'ємна щільність кінетичної енергії може бути виражена через швидкість її руху:

$$k = \frac{c_1^2 W_\kappa^2}{m} = \frac{c_1^2 m w^2}{2m} = \frac{c_1^2 w^2}{2}. \quad (2.12)$$

Згідно з гіпотезою Колмогорова-Прандтля швидкість дисипації турбулентної енергії рівна

$$\varepsilon = c_d \frac{k^{3/2}}{L_{\max}}, \quad (2.13)$$

де $c_d = 0,09$ – емпірична константа L_{\max} – масштаб турбулентності, тобто максимальний розмір вихришки. Спрощено вважаючи, що кінетична енергія руху циліндрового шару рідини зменшується на величину, рівну дисипації енергії турбулентного руху, отримаємо

$$-m\varepsilon = W'_\kappa = \left(\frac{mw^2}{2} \right)' = \frac{mww'}{2} = \frac{F_{\text{турб}}w}{2},$$

$$F_{\text{турб}} = -\frac{2m\varepsilon}{w},$$

де $F_{\text{турб}}$ – додаткова сила опору руху, обумовлена дисипацією кінетичної енергії турбулентного руху. Підставляючи (2.12) і (2.13) в останню формулу, отримаємо

$$F_{\text{турб}} = -\frac{2m}{w} \frac{c_d}{L_{\max}} \left(\frac{c_1^2 w^2}{2} \right)^{3/2} = -\frac{c_d c_1^3}{L_{\max} \sqrt{2}} m w |w|. \quad (2.14)$$

Відповідно до другого закону Ньютона під впливом сил тиску, тертя і поверхневого натягнення циліндровий шар рідини рухатиметься з прискоренням $a = w' = 2R''$ у горизонтальному напрямі:

$$F_\delta + F_{\text{тр}} + F_{\text{турб}} - F_{\text{нат}} = ma, \quad (2.15)$$

Об'єднуючи (2.1), (2.2), (2.6), (2.15), отримаємо

$$\begin{aligned}
\frac{\rho g V^2(t)}{\pi R^3} - 0,455 \left(\lg \frac{2R|R'|}{\nu} \right)^{-2,58} 2\rho |R'|R' \pi R^2 - \frac{4c_d c_1^3}{L_{\max} \sqrt{2}} m(t) R'|R'| - 2\pi R \sigma &= \\
&= 2m(t)R'', \\
\frac{\rho g V^2(t)}{\pi R^3} - 0,455 \left(\lg \frac{2R|R'|}{\nu} \right)^{-2,58} 2\rho |R'|R' \pi R^2 - \frac{4c_d c_1^3}{L_{\max} \sqrt{2}} \rho V(t) R'|R'| - 2\pi R \sigma &= \\
&= 2\rho V(t)R'', \\
R'' = \frac{gV(t)}{\pi R^3} - 0,455 \left(\lg \frac{2R|R'|}{\nu} \right)^{-2,58} \frac{|R'|R'}{V(t)} \pi R^2 - \frac{\sqrt{2}c_d c_1^3 R'|R'|}{L_{\max}} - & \\
& - \frac{2\pi R \sigma}{\rho V(t)}. \tag{2.16}
\end{aligned}$$

Оскільки максимальний розмір вихору не може перевершувати товщини шаруючи рідини, то $L_{\max} \approx h(t) = \frac{V(t)}{\pi R^2}$.

Тоді (2.16) набуде вигляду

$$\begin{aligned}
R'' = \frac{gV(t)}{\pi R^3} - 0,455 \left(\lg \frac{2R|R'|}{\nu} \right)^{-2,58} \frac{|R'|R'}{V(t)} \pi R^2 - \frac{\sqrt{2}\pi c_d c_1^3 R'|R'|R^2}{V(t)} - & \\
& - \frac{2\pi R \sigma}{\rho V(t)}. \tag{2.17}
\end{aligned}$$

Рівняння (2.17) є нелінійним диференціальним рівнянням другого порядку відносно радіусу розливу і описує динаміку зміни радіусу в часі. Початкові умови визначаються співвідношеннями

$$R(0) = R_0, \quad R'(0) = 0, \tag{2.18}$$

де в якості початкового радіуса R_0 може бути прийнятий діаметр отвору, з якого відбувається витікання рідини. Якщо витікання рідини відбувається з постійною об'ємною витратою протягом інтервалу часу $(0, t_0)$, то

$$V(t) = \begin{cases} \pi R_0^2 \sqrt{\frac{2\sigma}{\rho g}} + vt, & t < t_0, \\ \pi R_0^2 \sqrt{\frac{2\sigma}{\rho g}} + vt_0, & t \geq t_0. \end{cases}$$

При чисельному розв'язанні рівняння (2.17) необхідно врахувати, що доданок, який відповідає силі тертя, має невизначеність при $R'(t) = 0$, а його граничне значення в цьому випадку дорівнює 0. Тому при чисельному рішенні досить вважати цей доданок рівним 0, якщо $R'(t) = 0$.

Як приклад на рис. 2.2 приведена зміна радіусу розливу мазуту в часі при її виділенні з об'ємною витратою $v = 10 \text{ л/с}$ протягом часу $t_0 = 100 \text{ с}$. Лінією 2 показано граничне значення радіусу розливу R_{\max} , відповідне поточному об'єму рідини, що розлилася, і розраховане по формулі (2.3). Фізичні характеристики мазуту прийняті $\rho = 900 \text{ кг/м}^3$, $\sigma = 0,03 \text{ Н/м}$, $\nu = 4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

На рис. 2.3 приведена зміна радіусу розливу бензину в часі для того ж об'ємної витрати і часу виділення. Фізичні характеристики бензину: $\rho = 780 \text{ кг/м}^3$, $\sigma = 0,0212 \text{ Н/м}$, $\nu = 6 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$.

Аналіз приведених залежностей показує, що наявність сил тертя уповільнює розтікання рідини: у той час витікання складає 100 с, час досягнення розливом максимального радіусу складає близько 300 с.

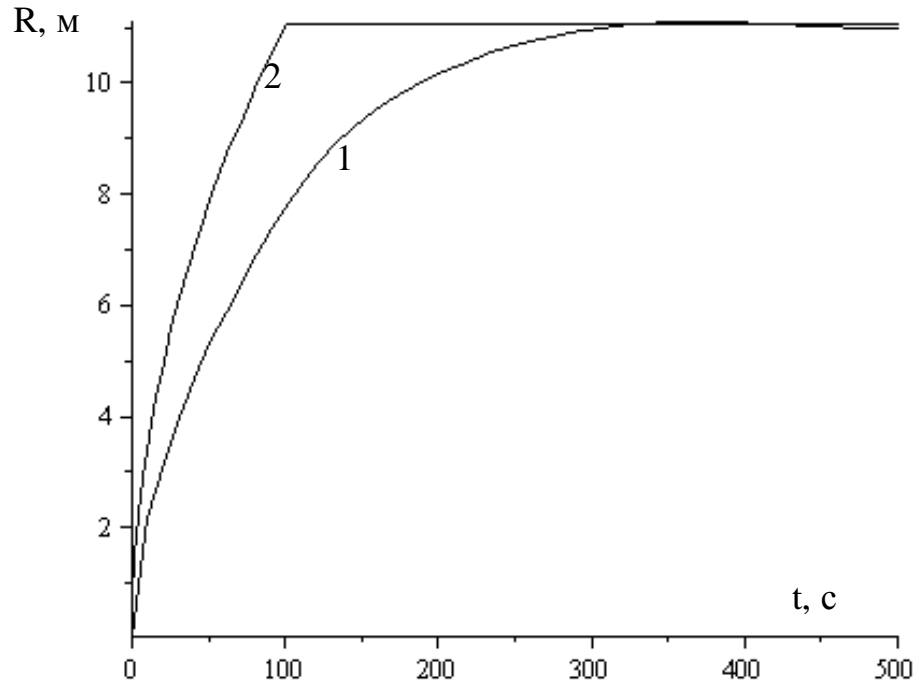


Рис. 2.2. Зміна радіусу розливу мазуту з часом: 1 – радіус розливу; 2 – граничне значення радіусу для даного об'єму рідини

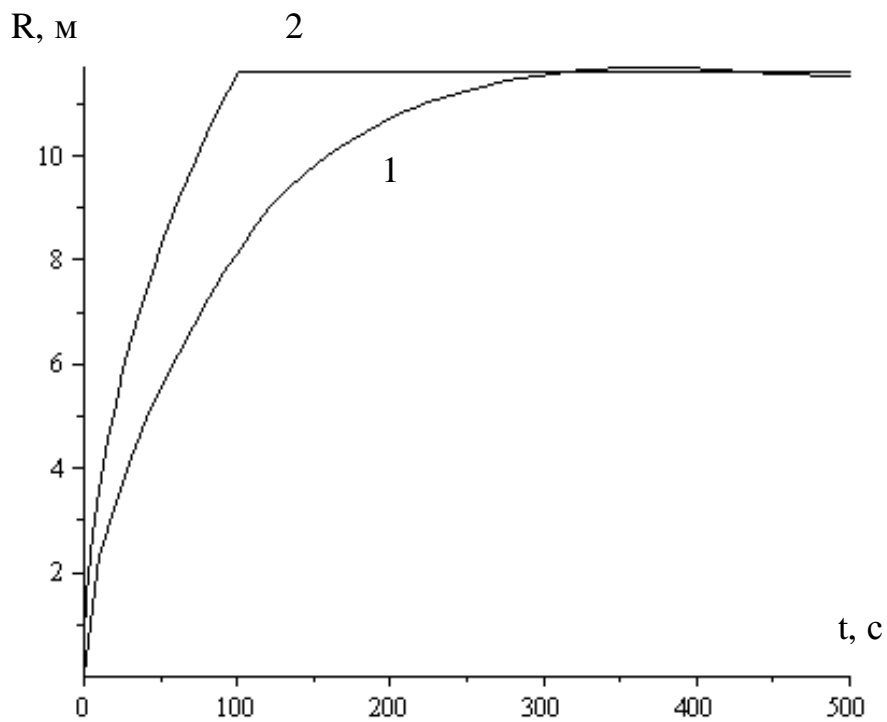


Рис. 2.3 Зміна радіусу розливу бензину з часом: 1 – радіус розливу; 2 – граничне значення радіусу для даного об'єму рідини

Аналіз розв'язку рівняння (2.17) на рис. 2.2, 2.3 показує, що має місце затухаючий коливальний процес. Ця особливість викликана погрішністю побудованої моделі: використання сили тиску (2.6) і сили поверхневого натягнення (2.2) для опису динаміки зміни радіусу розливу є спрощенням.

При практичному використанні побудованої моделі достатньо фіксувати момент часу, в який відбувається перше досягнення граничного радіусу, і вважати, що після цього він залишається незмінним.

2.2. Особливості розтікання рідини по нерівній поверхні

Побудована вище модель передбачають розтікання на ідеально гладкій поверхні, але будь-якій реальній поверхні (бетон, асфальт, ґрунт, щебінь) властиві нерівності. Це можуть бути, наприклад, тріщини, поглиблення, рослинність і так далі. Тому, розтікання рідини супроводжується заповненням поглиблень, викликаних цими нерівностями. Фактично це означає, що деякий об'єм рідини, що розтікається, витрачається на заповнення поглиблень:

$$V_{y2l}(t) = S(t)\delta,$$

де $V_{y2l}(t)$ – об'єм рідини що заповнила поглиблення до моменту часу t ; $S(t)$ – площа розливу у момент часу t ; δ – середня глибина нерівностей поверхні.

$$R'' = \frac{g(V(t) - V_{y2l}(t))}{\pi R^3} - 0,455 \left(\lg \frac{2R|R'|}{\nu} \right)^{-2,58} \frac{|R'|R'}{(V(t) - V_{y2l}(t))} \pi R^2 - \frac{\sqrt{2}\pi c_d c_1^3 R'|R'|R^2}{(V(t) - V_{y2l}(t))} - \frac{2\pi R\sigma}{\rho(V(t) - V_{y2l}(t))}.$$

З врахуванням залежності $V_{y2l} = \pi R^2 \delta$ для рідини, що розтікається у формі круга, рівняння (2.17) прийме вигляд

$$R'' = \frac{g(V(t) - \pi R^2 \delta)}{\pi R^3} - 0,455 \left(\lg \frac{2R|R'|}{\nu} \right)^{-2,58} \frac{|R'|R'}{(V(t) - \pi R^2 \delta)} \pi R^2 - \frac{\sqrt{2}\pi c_d c_1^3 R'|R'|R^2}{(V(t) - \pi R^2 \delta)} - \frac{2\pi R \sigma}{\rho(V(t) - \pi R^2 \delta)}. \quad (2.19)$$

При цьому максимальний радіус розливу рідини об'єму V визначатиметься із співвідношення

$$V = \pi R_{\max}^2 \delta + \pi R_{\max}^2 h_{\min}, \quad (2.20)$$

де перший доданок в правій частині відповідає об'єму рідини, що заповнила нерівності поверхні, а друге – рівновазі сили поверхневого натягнення і сили тиску на бічні стінки циліндра. Підставляючи (2.3) в (2.20), отримаємо максимальний радіус розливу, відповідний об'єму рідини:

$$R_{\max} = \sqrt{\frac{V}{\pi \left(\delta + \sqrt{\frac{2\sigma}{\rho g}} \right)}}. \quad (2.21)$$

Отримана залежність дозволяє визначити середню глибину нерівності поверхні при відомому об'ємі розлитої рідини і максимальній площі розливу S_{\max} :

$$\delta = \frac{V}{S_{\max}} - \sqrt{\frac{2\sigma}{\rho g}}. \quad (2.22)$$

Наявність нерівностей на поверхні приводить до того, що у міру вигорання радіус розливу не скорочується, оскільки рідина залишається в

поглибленнях. Але площа поверхні, що горить, скорочується за рахунок вигорання рідини з менш глибоких областей (мал. 2.4).

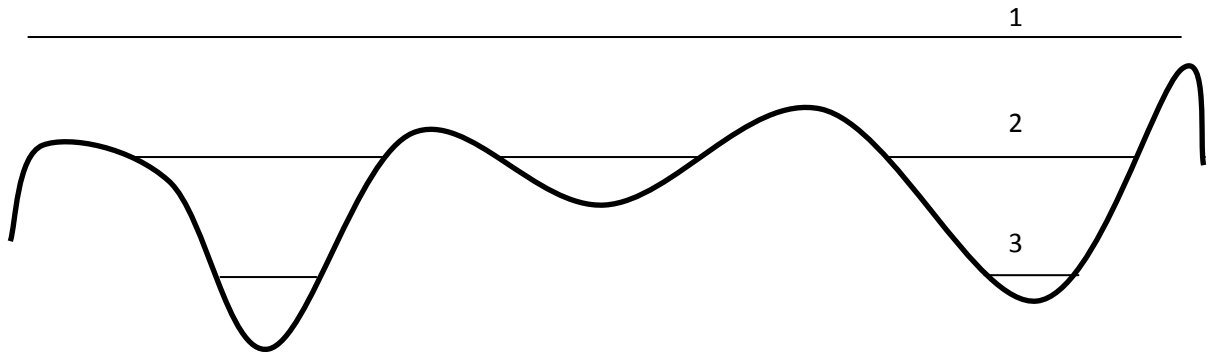


Рис. 2.4. Скорочення площі поверхні рідини при її вигоранні на нерівній поверхні: 1, 2, 3 – рівні рідини в моменти часу t_1 , t_2 , t_3 відповідно, $t_1 < t_2 < t_3$

Тому, в разі горіння рідини на нерівній поверхні рівняння (2.19) описують не дійсний радіус розливу $R(t)$ і області, що горить $R_2(t)$, а еквівалентні – $R_9(t)$, $R_{32}(t)$ – площі яких збігаються з площею поверхні рідини (рис. 2.4).

РОЗДІЛ 3

ТЕПЛОВИЙ ВПЛИВ ПОЖЕЖІ В ОБВАЛУВАННІ НА РЕЗЕРВУАР

3.1. Модель теплового впливу пожежі розливу горючої рідини на резервуар з нафтопродуктом

При побудові моделі нагріву стінки резервуара будемо виходити з наступних припущень.

1. Передача тепла від факела розливу горючої рідини, що горить в обвалуванні, до стінки резервуару здійснюється випромінюванням від поверхні факела за законом Стефана-Больцмана [6, 15, 17]

$$q_{\epsilon} = c_0 \epsilon_{\phi} \epsilon_w \left(\left(\frac{T_{\phi}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_w}{100} \right)^4 \right) \psi, \quad (3.1)$$

де $c_0 = 5,67 \frac{Вт}{м^2 K^4}$ – константа; ϵ_{ϕ} , ϵ_w – ступені чорноти факела і елементарної площадки; T_{ϕ} , T_w – температури випромінюючої поверхні факела і елементарної площадки відповідно; ψ – коефіцієнт взаємного опромінення.

2. Стінка приймає участь в конвекційному теплообміні з продуктами горіння та розігрітим повітрям, що здіймаються над осередком горіння, за законом Ньютона [14, 21]

$$q_k = \alpha(T_f - T_w), \quad (3.2)$$

де α – коефіцієнт конвекційного теплообміну; T_f – температура повітряного потоку, що контактує з резервуаром.

3. Суха стінка резервуара, яка нагрівається, віддає тепло випромінюванням в навколишнє середовище і всередину резервуара.

4. Суха стінка резервуару приймає участь в конвекційному теплообміні з пароповітряною сумішшю всередині газового простору резервуару. Температура пароповітряної суміші співпадає з температурою навколишнього середовища.

5. Температура стінки резервуара однакова по її товщині.

6. Теплопровідність стінки в повздовжньому напрямку не впливає на розподіл температур по ній

Припущення (6) спирається на експериментальні дані [2], які свідчать, що області на стінці резервуара, розташовані на відстані 30 см є практично теплоізольованими. Зокрема, охолоджувальний вплив рідини в резервуарі не розповсюджується вище 30 см над її рівнем.

Для побудови математичної моделі теплового впливу пожежі в обвалуванні на суху стінку резервуара з урахуванням конвекційного впливу висхідних потоків від осередку горіння розглянемо елементарну площадку Δ площею S на сухій стінці резервуара з нафтопродуктом. Вона бере участь у наступних видах теплообміну (рис. 3.1):

- теплообміні випромінюванням з факелом – q_1 ;
- конвекційному теплообміні з висхідними повітряними потоками над факелом – q_2 ;
- теплообміні випромінюванням з навколишнім середовищем – q_3 ;
- теплообміні випромінюванням з внутрішнім простором резервуара – q_4 ;
- конвекційному теплообміні з пароповітряною сумішшю в газовому просторі резервуара – q_5 .

Відповідно до закону Стефана-Больцмана, густина теплового потоку випромінюванням від факела визначається за формулою (3.1), де

$$\psi = \frac{1}{\pi} \iint_{S_\phi} \frac{(\vec{r}, \vec{n}_\phi)(\vec{r}, \vec{n})}{r^4} dS_\phi, \quad (3.3)$$

S_ϕ – поверхня факела; \vec{r} – радіус-вектор, що з'єднує точки на поверхнях факела і елементарної площадки; \vec{n}_ϕ , \vec{n} – одиничні нормальні вектори до поверхонь факела і елементарної площадки відповідно. При цьому інтеграл береться лише по тих точках поверхні S_ϕ , в яких радіус-вектор утворює гострий кут як з нормальним вектором \vec{n}_ϕ , так і нормальним вектором \vec{n} , тобто обидва скалярні добутки в чисельнику інтеграла (3.3) є додатними.

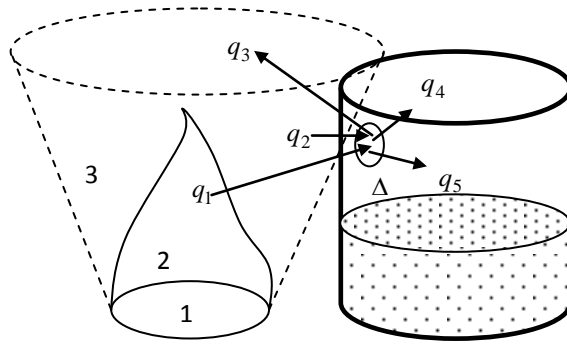


Рис. 3.1. Теплообмін стінки резервуара при пожежі в обвалуванні: 1 – розлив; 2 – факел; 3 – висхідні повітряні потоки над осередком горіння

За законом Ньютона (3.2), густина теплового потоку, що отримує елементарна площадка шляхом конвекційного теплообміну з висхідними повітряними потоками, які здіймаються над осередком горіння, дорівнює

$$q_2 = \alpha_2(T_f - T_w), \quad (3.4)$$

де α_2 – коефіцієнт конвекційного теплообміну. В залежності від відстані між осередком горіння і елементарною площадкою Δ , а також напрямком і швидкістю вітру, можливий як випадок $T_f \geq T_w$, так і $T_f \leq T_w$. В першому випадку елементарна площадка буде отримувати тепло від повітряного потоку ($q_2 \geq 0$), а в другому – віддавати ($q_2 \leq 0$).

Оскільки коефіцієнт опромінення елементарної площадки зі всім навколишнім середовищем (включно з факелом) дорівнює 1, то густина теплового потоку випромінюванням у навколишнє середовище без урахування факела складає

$$q_3 = c_0 \varepsilon_w \left[\left(\frac{T_0}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_w}{100} \right)^4 \right] (1 - \psi), \quad (3.5)$$

де T_0 – температура навколишнього середовища.

Внутрішня поверхня елементарної площадки приймає участь в теплообміні випромінюванням з поверхнею нафтопродукту, стінками і покрівлею резервуара. Приймаючи ступінь чорноти поверхні нафтопродукту приблизно рівним ступеню чорноти стінки, отримуємо густина теплового потоку випромінюванням від елементарної площадки до стін, покрівлі резервуара і поверхні нафтопродукту:

$$q_4 = c_0 \varepsilon_w^2 \left[\left(\frac{T_0}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_w}{100} \right)^4 \right], \quad (3.6)$$

де коефіцієнт взаємного опромінення з перерахованими вище поверхнями дорівнює 1, а температура цих поверхонь прийнята рівною температурі навколишнього середовища.

Густина теплового потоку внаслідок конвекційного теплообміну з пароповітряною сумішшю в газовому просторі резервуара дорівнює

$$q_5 = \alpha_5 (T_0 - T_w), \quad (3.7)$$

де α_5 – коефіцієнт конвекційного теплообміну.

Густина загального теплового потоку, який припадає на елементарну

площадку має вигляд

$$q = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5, \quad (3.8)$$

де $q_1 > 0$, $q_3 < 0$, $q_4 < 0$, $q_5 < 0$; q_2 може набувати як від'ємних, так і додатних значень в залежності від температури елементарної площадки, розташування осередку горіння, напрямку і швидкості вітру.

Загальна кількість тепла, яку одержує область Δ за проміжок часу dt , йде на її нагрів на температуру dT_w : $qSdt = mcdT_w = \rho VcdT_w = \rho S\delta cdT_w$, де m , V – маса і об'єм стінки резервуара в межах елементарної площадки Δ ; δ – товщина стінки резервуара; ρ , c – густина і теплоємність матеріалу стінки (сталь).

Тоді динаміка зміни температури елементарної площадки Δ описується диференціальним рівнянням

$$\frac{dT_w}{dt} = \frac{q}{\rho\delta c}. \quad (3.9)$$

Об'єднуючи (3.1), (3.4), (3.5), (3.6), (3.7), (3.8) і підставляючи їх в (3.9), отримаємо диференціальне рівняння нагріву елементарної площадки на сухій стінці резервуара під тепловим впливом пожежі

$$\begin{aligned} \frac{dT_w}{dt} = & \frac{c_0 \varepsilon_\phi \varepsilon_w}{\rho\delta c} \left[\left(\frac{T_\phi}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_w}{100} \right)^4 \right] \psi + \\ & + \frac{c_0 \varepsilon_w}{\rho\delta c} \left[\left(\frac{T_0}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_w}{100} \right)^4 \right] (1 - \psi) + \frac{\alpha_2 (T_f - T_w)}{\rho\delta c} + \\ & + \frac{c_0 \varepsilon_w^2}{\rho\delta c} \left[\left(\frac{T_0}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_w}{100} \right)^4 \right] + \frac{\alpha_5 (T_0 - T_w)}{\rho\delta c} \end{aligned} \quad (3.10)$$

з початковою умовою

$$T_w(0) = T_0. \quad (3.11)$$

Значну складність при практичному застосуванні рівняння (3.10)-(3.11) являє розрахунок конвекційної складової [7, 20]. Існують оцінки коефіцієнту конвекційної тепловіддачі, але їх застосування потребує знання швидкості повітряного потоку, що здійснюється над осередком горіння.

3.2. Оцінка швидкості висхідних потоків над розливом, що горить

Розглянемо процес горіння розливу горючої рідини (рис. 3.2): в зону горіння надходять пари горючої рідини, що випаровуються з її поверхні, і повітря, а продукти горіння здійснюються вгору [12, 16].

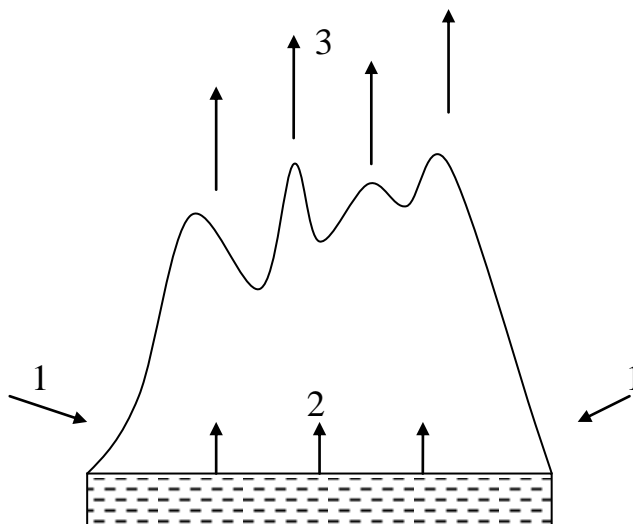
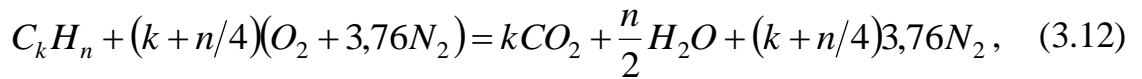


Рис. 3.2. Схема горіння горючої рідини з вільної поверхні: 1 – повітря; 2 – пари горючої рідини; 3 – продукти горіння

Розглянемо витрати газу в об'ємі, в якому відбувається горіння. Будемо описувати нафтопродукт умовною хімічною формулою $C_k H_n$, а процес горіння рівнянням



де враховано молекулярний склад повітря у вигляді $(O_2 + 3,76N_2)$. Аналіз рівняння (3.12) показує, що в реакції приймає участь $4,76(k + n/4)$ молей кисню, азоту і парів горючої рідини, внаслідок чого утворюється $[k + n/2 + 3,76(k + n/4)]$ молей азоту і продуктів горіння.

В реакцію вступають гази з температурою T_1 , а продукти горіння мають температуру T_2 . Крім того, будемо вважати всі ці гази ідеальними і такими, що задовольняють співвідношенню $pV/T = const$, де p – тиск; V – об'єм газу; T – температура. Приймаючи тиск в зоні горіння таким, що приблизно дорівнює атмосферному тиску, отримаємо $V/T = const$.

Тоді загальний об'єм повітря і парів горючої рідини, що вступають в реакцію, визначається їх кількістю і температурою:

$$V_1 = 4,76 \cdot 22,4(k + n/4) \frac{T_1}{T_0}.$$

Аналогічно, об'єм утворених внаслідок реакції продуктів горіння дорівнює

$$V_2 = 22,4[k + n/2 + 3,76(k + n/4)] \frac{T_2}{T_0}.$$

Тоді приріст об'єму внаслідок реакції горіння (3.12)

$$\Delta V = 22,4[k + n/2 + 3,76(k + n/4)] \frac{T_2}{T_0} - 4,76 \cdot 22,4(k + n/4) \frac{T_1}{T_0}. \quad (3.13)$$

При цьому відносний приріст об'єму буде складати

$$\frac{\Delta V}{V_1} = \frac{22,4[k + n/2 + 3,76(k + n/4)]\frac{T_2}{T_0} - 4,76 \cdot 22,4(k + n/4)\frac{T_1}{T_0}}{4,76 \cdot 22,4(k + n/4)\frac{T_1}{T_0}};$$

$$\frac{\Delta V}{V_1} = \frac{1 + \alpha/2 + 3,76(1 + \alpha/4)}{4,76(1 + \alpha/4)} \frac{T_2}{T_1} - 1,$$

де $\alpha = n/k$. На рис. 3.3 показано залежність відносного приросту об'єму від відношень $\alpha = n/k$ і T_2/T_1 .

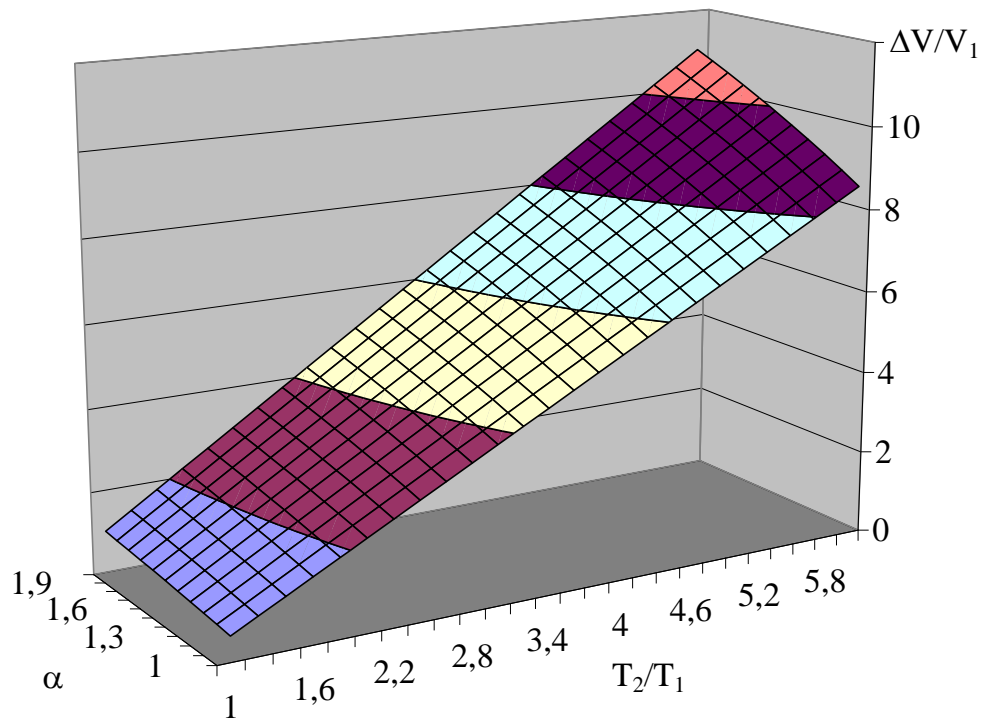


Рис. 3.3. Відносний приріст об'єму продуктів горіння в залежності від відношення кількості атомів водню до атомів вуглецю (α) в горючій рідині і відношення температур до і після реакції горіння (T_2/T_1)

Аналіз графічних залежностей на рис. 3.2 засвідчує, що більш вагомий вклад в приріст об'єму вносить відношення температур речовин до початку реакції горіння та після неї.

Аналіз рівнянь (3.12), (3.13) показує, що при згоранні вуглеводневого палива масою $m = 12k + n$ утворюється надлишковий об'єм газу ΔV . При горінні нафтопродукту з питомою масовою швидкістю вигорання η з вільною площею S протягом часу Δt буде вигорати кількість нафтопродукту масою $m_0 = \eta S \Delta t$.

При цьому буде утворюватися надлишковий об'єм продуктів горіння:

$$\Delta V = 22,4\eta S \frac{[k + n/2 + 3,76(k + n/4)] \frac{T_2}{T_0} - 4,76 \cdot 22,4(k + n/4) \frac{T_1}{T_0}}{12k + n} \Delta t.$$

Наявність надлишкового об'єму призводить до утворення висхідних потоків над областю горіння (рис. 3.2). Витрати газового середовища в цих потоках складають $\Delta Q = \frac{\Delta V}{\Delta t}$. Середня швидкість цих потоків над областю горіння

складає

$$u_0 = \frac{\Delta Q}{S} = 22,4\eta \frac{[k + n/2 + 3,76(k + n/4)] \frac{T_2}{T_0} - 4,76 \cdot 22,4(k + n/4) \frac{T_1}{T_0}}{12k + n}.$$

Будемо вважати, що повітря і пари нафтопродукту, які вступають в реакцію, мають температуру кипіння нафтопродукту $T_{\text{кип}}$, а температура продуктів горіння дорівнює температурі факела T_ϕ . Тоді швидкість висхідних потоків безпосередньо над областю горіння може бути оцінена виразом

$$u_0 = 22,4\eta \frac{[1 + \alpha/2 + 3,76(1 + \alpha/4)] \frac{T_\phi}{T_0} - 4,76(1 + \alpha/4) \frac{T_{\text{кип}}}{T_0}}{12 + \alpha}.$$

Таким чином, швидкість висхідних потоків над осередком горіння буде

визначатися відношенням α кількості атомів вуглецю до кількості атомів водню в умовній хімічній формулі горючої рідини, а також температурою факела, температурою кипіння і питомою масовою швидкістю вигорання. Орієнтовні швидкості висхідних потоків для деяких типів нафтопродуктів наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Швидкість висхідних потоків над осередком горіння для деяких горючих рідин

Горюча рідина	Умовна хімічна формула	Питома масова швидкість вигорання, η , кг/м ² с	Температура кипіння, $T_{кип}$, °С	Температура факела, T_{ϕ} , °С	Швидкість, u_0 , м/с
Бензин	C_8H_{18}	0,048	33÷205	1200	2,3÷2,6
Дизельне пальне	$C_{10}H_{20}$	0,055	170÷380	1000	1,6÷2,1
Гас	$CH_{1,95}$	0,038	175÷270	1000	1,3÷1,4

Слід відзначити, що наведені в табл. 3.1 оцінки швидкості висхідних потоків мають місце в області, розташованій безпосередньо над зоною горіння. Зі збільшенням висоти швидкість висхідних потоків буде зменшуватися внаслідок втягнення нерухомих мас навколишнього повітря, а також внаслідок охолодження продуктів горіння і розігрітого повітря.

ВИСНОВКИ

1. Найбільш поширеними резервуарами для зберігання нафти і нафтопродуктів є вертикальні сталеві резервуари (РВС). Пожежам в резервуарах та резервуарних парках передують розливи нафти або нафтопродуктів. Основним засобом гасіння нафти та нафтопродуктів у резервуарах і резервуарних парках є повітряно-механічна піна низької та середньої кратності.

2. Побудовано модель гравітаційного розтікання рідини на нерівній горизонтальній поверхні, що враховує сили тяжіння, сили в'язкого тертя дисипацію кінетичної енергії турбулентного руху.

3. Побудовано модель теплового впливу пожежі в обвалуванні на резервуар з нафтопродуктом. Модель враховує променевий і конвекційний теплообмін стінки резервуара з факелом і навколишнім середовищем.

4. Побудовано оцінку швидкості висхідних потоків над осередком горіння нафтопродукту.

5. Розроблені моделі є основою для побудови системи підтримки ухвалення рішення керівником гасіння пожежі. Вони можуть бути використані при розробці оперативних планів пожежегасіння під час штабних навчань, розробці планів локалізації і ліквідації пожежі в бойовій обстановці, моніторингу надзвичайної ситуації в ході локалізації і ліквідації пожежі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бабенко Ю.В. Протипожежний захист складів нафти і нафтопродуктів. Оглядова інформація / Ю.В. Бабенко, В.Г. Дудченко А.М. Басаєв та ін. – К.: УкрНДІПБ, 2002.– 142 с.
2. Волков О.М. Пожарная безопасность резервуаров с нефтепродуктами / О.М. Волков. – М.: Недра, 1984. – 151 с.
3. Шароварников А.Ф. Тушение пожаров нефти и нефтепродуктов / А.Ф. Шароварников, В.П. Молчанов, С.С. Воевода, С.А. Шароварников. – М.: Калан, 2002. – 448 с.
4. Less F. Loss prevention in the process industries / Frank P. Less. – Elsevier. – 497 p.
5. Person H. Tank fire review of fire incidents 1951-2003 / H. Persson A. Lonnermark // Brandforsk Project 513-021. – Boras: Swedish National Testing and Research Institute. – 2004.
6. Chatris J. Comb. and Flame / J. Chatris, J. Quintela, J. Folch, E. Planas, J. Arnoldos. – 2001. V. 126. – P.1373.
7. Mudan K.S. Fire Hazard Calculations for Large Open Hydrocarbon Fires // K.S. Mudan, P.A. Croce. – The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering . NFPA-SFPE. – Boston, 1988.
8. Иванов Е.Н. Противопожарная защита открытых технологических установок / Е.Н. Иванов. – М.: Химия, 1986. – 288 с.
9. Козлитин А.М. Количественный анализ риска возможных разливов нефти и нефтепродуктов / А.М. Козлитин, А.И. Попов, П.А. Козлитин // Управление промышленной и экологической безопасностью производственных объектов на основе риска. – Саратов: СГТУ, 2005. – С. 135-160.
10. Горпинич И.А. Методы оценки площади разлива горючей жидкости при аварии железнодорожной цистерны / И.А. Горпинич // Пожарная безопасность. – Харьков: НУГЗУ, 2012. – Вып. 31. – С. 44-47.
11. Mizner G.A. Comb. Sci. and Techn. / G.A. Mizner, J.A. Eyre. – 1983. –

V. 35. – P. 33.

12. Блинов В.И. Диффузионное горение жидкостей / В.И. Блинов, Г.Н. Худяков. – М.: АН СССР, 1961. – 206 с.

13. Casal J. Evaluation of the Effects and Consequences of Major Accidents in Industrial Plants / Joaquim Casal. – Industrial Safety Series. –V. 8. – Elsevier, 2008. – 117 p.

14. Thomas P.H. The size of flames from natural fires / P.H. Thomson // Proc. Combust. Inst., 1963. – V.9. – P. 844.

15. Siegel R. Thermal Radiation Heat Transfer // R. Siegel, J.R. Howel. – Taylor & Francis. – New York, 1992.

16. Schalike S. Flame Heights of Di-tert-butyl Peroxide Pool Fires – Experimental Study and Modeling / S. Schalike, K. Wehrstedt, A. Schonbucher // Chemical Engineering Transactions. – 2012. – V. 26. – P.363-368.

17. Драйздейл Д. Введение в динамику пожаров / Д. Драйздейл. – М.: Стройиздат, 1990. – 420 с.

18. Інструкція щодо гасіння пожеж у резервуарах із нафтою і нафтопродуктами. НАПБ 05.02: Офіц. вид. – К.: М-во з питань надзвичайних ситуацій та у справах захисту населення від наслідків Чорнобильської катастрофи, 2003. – 81 с. – (нормативний документ МНС України. Інструкція).

19. Клепоносов Н.Н. Пожарная защита объектов нефтяной и газовой промышленности / Н.Н. Клепоносов, А.И. Сорокин. – М.: Недра, 1983. – 192 с.

20. Mudan K. S. Prog. Energy Combust. Sci. – 1984. – V. 10. – P. 59.

21. Рябова І.Б., Сайгук І.В., Шаршанов А.Я. Термодинаміка і теплопередача у пожежній справі. – Харків: АПБУ, 2002. – 352 с.