

УДК 614.843 (075.32)

Д.П. Войтович, канд. техн. наук,
Е.М. Гуліда, д-р техн. наук, проф.

Львівський державний університет безпеки життєдіяльності,
м. Львів, Україна, e-mail: djozzik@gmail.com

ВПЛИВ ПОЖЕЖІ НА ВИКИДИ ТОКСИЧНИХ ПРОДУКТІВ ЗГОРАННЯ НА ОБ'ЄКТАХ ЗБЕРІГАННЯ НАФТИ ТА НАФТОПРОДУКТІВ

D.P. Voytovych, Cand. Sci. (Tech.),
E.M. Hulida, Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine,
e-mail: djozzik@gmail.com

EMISSION OF TOXIC COMBUSTION PRODUCTS CAUSED BY FIRE AT STORAGES OF CRUDE OIL AND PETROLEUM PRODUCTS

Мета. На основі результатів теоретичних та експериментальних досліджень запропонувати метод, що дозволить встановити залежність між площею пожежі та кількістю викидів токсичних продуктів згорання під час її виникнення на об'єктах зберігання нафти й нафтопродуктів та зменшити кількість викидів за рахунок впровадження високоефективних інженерно-технічних протипожежних заходів.

Методика. Для вирішення даної задачі за основу була прийнята методика розрахунку сил і засобів для гасіння пожеж у резервуарах. Предметом дослідження є площа пожежі у вертикальному сталевому резервуарі РВС-5000 та кількість токсичних продуктів згорання, що виділяється в конвективному потоці внаслідок можливої пожежі.

Визначення забруднення продуктами згорання навколишнього природного середовища проводили з використанням залежностей, що включають питомі значення можливих викидів токсичних продуктів (стехіометричні коефіцієнти). Вплив на значення кожного показника в бік його зменшення досягнуто за рахунок впровадження високоефективних інженерно-технічних протипожежних заходів.

Результати. Надають можливість проводити моніторинг об'єктів зберігання нафти та нафтопродуктів з точки зору екологічної безпеки та здійснювати управління нею. Окрім того, з використанням запропонованих залежностей можливо визначати кількісні складові викидів токсичних продуктів згорання, що виділяються під час процесу горіння до навколишнього середовища на об'єктах зберігання нафти й нафтопродуктів.

Наукова новизна. Розроблена методологія визначення кількісного показника екологічного забруднення токсичними продуктами згорання навколишнього природного середовища від пожеж на об'єктах зберігання нафти та нафтопродуктів з урахуванням погодних умов і середовища просторового поширення.

Практична значимість. Результати роботи рекомендуються для впровадження у практику експлуатації об'єктів зберігання нафти та нафтопродуктів, у практику адміністративно-господарського управління цими об'єктами з метою забезпечення пожежної та екологічної безпеки, а також у практику діяльності науково-дослідних і проектно-конструкторських установ при проектуванні даних об'єктів та у навчальний процес вищих технічних навчальних закладів при вивченні дисциплін пожежного та екологічного спрямування.

Ключові слова: *пожежна, екологічна безпека, токсичні продукти згорання, інженерно-технічні протипожежні заходи*

Постановка проблеми. Екологічну безпеку, у більшій мірі, пов'язують із попередженням та прогнозуванням надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру, де розглядають імовірність виникнення несприятливих для навколишнього середовища наслідків та будь-яких змін природних об'єктів і факторів. Частіше розглядається техногенний аспект надзвичайних ситуацій – імовірність виникнення техногенних аварій (катастроф), що здатні завдати істотної шкоди навколишньому середовищу або здоров'ю людей. Це дозво-

ляє проводити моніторинг стану та управління екологічною безпекою об'єкту, не допускати, а в разі виникнення – ліквідувати розвиток можливих надзвичайних ситуацій. На сьогоднішній день відомі роботи наступних авторів, що присвячені даній проблематиці: І. А. Рябініна, М. М. Биченка, А. В. Яцика, А. В. Лушчика та ін. Проте в даних роботах не розглядалось питання щодо управління екологічною безпекою під час надзвичайних ситуацій, унаслідок яких відбувається забруднення природного навколишнього середовища за рахунок виділення токсичних продуктів згорання від пожежі.

Достатньо великого впливу на навколишнє середовище у випадку виникнення надзвичайних ситуацій завдають об'єкти хімічної галузі, у тому числі об'єкти зберігання нафти та нафтопродуктів. Під час пожеж на даних об'єктах температура в зоні теплової дії сягає 1100–1300°C, можливе перевищення граничнодопустимих концентрацій продуктів згорання, що виділяються та можуть мати негативний вплив на організм людини. Окрім того, у процесі проходження реакції горіння утворюється дим, оптична густина якого може перевищувати допустиме значення. Пожежі, що виникають за певних умов, призводять до перевищення допустимого екологічного ризику та здійснюють забруднення навколишнього природного середовища.

У підтвердження цього є статистичні дані Українського науково-дослідного інституту цивільного захисту щодо кількості пожеж на території України, у тому числі й на об'єктах зберігання нафти та нафтопродуктів. Вони стверджують, що кількість пожеж з кожним роком не перестає зменшуватись у порівнянні з попередніми роками. У період з 2004 по 2013 рік на даних об'єктах зареєстровано 106 пожеж, унаслідок яких загинуло 16 осіб, прями матеріальні збитки склали 5 479,8 тис. грн. При цьому не наводяться дані щодо забруднення навколишнього природного середовища внаслідок цих пожеж токсичними продуктами згорання, що призводить до порушення балансу екологічної безпеки.

Така ситуація обумовлює проблему в невизначеності взаємозв'язку між площею пожежі та викидом токсичних продуктів згорання в конвективному потоці під час виникнення, вирішення якої дозволить з певною вірогідністю прогнозувати екологічну безпеку на локальному рівні та управляти нею на основі отриманих результатів.

Аналіз останніх досягнень і публікацій. На сьогоднішній день зустрічається дуже обмежена кількість робіт, що пов'язана з екологічною безпекою внаслідок пожеж. Пожежі на об'єктах зберігання нафти та нафтопродуктів, їх вплив на навколишнє середовище розглядалися дещо в іншому аспекті. Відомі роботи, де увага приділяється питанням визначення густини теплового потоку, вражаючої дії теплового потоку на організм людини, наслідків аварійних вибухів паливно-повітряних сумішей, оцінки ймовірності ураження об'єкта повітряною ударною хвилею тощо, як наприклад у В.В. Яковлева.

У роботі Аносової Є.Б. і Кулайшина С.А. наведено лише загальний взаємозв'язок між пожежами при розлитті легкозаймистих та горючих речовин на складах нафти й нафтопродуктів та їх впливом на навколишнє середовище. Мова йде про необхідність отримання кількісних характеристик зовнішніх факторів – забруднення навколишнього середовища у вигляді концентрацій, об'ємів, зон поширення та інших параметрів із посиленням на методику визначення розміру забруднення, заподіяного доквітлю в результаті пожеж на території міста Москва.

Одним із варіантів визначення наслідків від пожежі на потенційно небезпечному об'єкті, яким є нафтобаза, може бути он-лайн сервіс „Прогноз наслідків пожежі

від проливу легкозаймистих і горючих рідин“. Дана робота дозволяє, за умови введення вихідних даних, отримати орієнтовну висоту полум'я пожежі, приведену масову швидкість вигорання палива, середньо-поверхневу густину теплового випромінювання полум'я.

У роботі [1] наведена методика кількісної оцінки ризику аварій на небезпечних виробничих об'єктах нафто-газопереробної, нафто- та газохімічної промисловості. Вона включає визначення сценарію розвитку аварії, оцінку частоти можливих сценаріїв аварій, оцінку можливих наслідків за сценаріями аварій, що розглядаються, розрахунок показників ризику аварії (індивідуальний ризик $R_{інд}$, потенційний ризик $R_{пот}$, колективний ризик $R_{кол}$, соціальний ризик $F_{(с)}$, частота реалізації аварії із загибеллю не менше однієї людини R_{1}).

Також відомі й інші праці, в яких описані процеси моделювання пожеж у резервуарних парках з нафтою та нафтопродуктами, проте вони не дають можливості визначити вплив виділених токсичних продуктів згорання на локальне забруднення навколишнього природного середовища.

Кожна з вищенаведених робіт тим чи іншим чином розглядає питання можливості виникнення пожеж (аварій) на складах нафти й нафтопродуктів, прогнозування їх наслідків, проте жодна з них не висвітлює залежності між її площею та викидом токсичних продуктів згорання до навколишнього природного середовища. Незважаючи на статистику, кількості пожеж на об'єктах зберігання нафти та нафтопродуктів, характеристику даних подій, як надзвичайно складних процесів з великими матеріально-економічними та екологічними збитками, розв'язування задачі по впливу пожеж на екологічне забруднення є актуальною задачею.

Мета роботи. На основі результатів теоретичних та експериментальних досліджень запропонувати метод, що дозволить встановити залежність між площею пожежі та кількістю викидів токсичних продуктів згорання під час її виникнення на об'єктах зберігання нафти та нафтопродуктів, зменшити кількість викидів за рахунок впровадження вискоєфективних інженерно-технічних протипожежних заходів.

Виклад основного матеріалу. Метод встановлення залежності між площею пожежі та викидом токсичних продуктів згорання в конвективному потоці під час її виникнення на об'єктах зберігання нафти й нафтопродуктів. Виникнення пожежі на об'єкті зберігання нафти та нафтопродуктів призведе до локального екологічного забруднення навколишнього середовища в об'ємі, що, у певній мірі, буде пропорційний площі можливої пожежі.

У роботі [2] розглядається три варіанти розвитку пожежі:

а) виникнення та розвиток пожежі в одному наземному резервуарі без впливу на інші;

б) розповсюдження пожежі в межах однієї групи резервуарів;

в) розвиток пожежі з можливим руйнуванням резервуара, який горить, і резервуарів, що знаходяться поряд з ним, з наступним переходом його на сусідні групи резервуарів і за межі резервуарного парку.

Знаючи як розповсюджується пожежа в одному резервуарі та параметри її розвитку, можна прогнозувати загальну ситуацію розвитку пожежі в резервуарному парку за варіантом б та в.

Статистичний аналіз пожеж на об'єктах зберігання, перероблення й транспортування нафти та нафтопродуктів за останні 20 років свідчить про те, що із 200 пожеж – 92% із них виникли в наземних резервуарах [3].

Розрахунок виділених продуктів згорання під час пожежі у резервуарному парку проводимо в декілька етапів.

Визначення об'єму розповсюдження продуктів згорання. Знаходимо об'єм розповсюдження продуктів згорання, що виділяються з площі пожежі в резервуарі зі стаціонарною покрівлею.

Пожежа в резервуарі, у більшості випадків, починається з вибуху пароповітряної суміші, що утворюється під покрівлею резервуару. Вибух призводить до підриву (рідше до зриву) покрівлі з наступним горінням на всій поверхні горючої рідини. При цьому, навіть на початковій стадії, горіння нафти та нафтопродуктів у резервуарі може супроводжуватися потужним тепловим випромінюванням до навколишнього середовища, а висота полум'я складати 1–2 діаметри резервуара, що горить [2].

За основу для розрахунків приймаємо вертикальний сталевий резервуар типу РСВ-5000, як один з тих, на якому найчастіше виникають пожежі [3]. Висота частини факела полум'я в даному випадку буде становити 31,5–42 м при діаметрі резервуара $D = 21$ м, що обумовлюється його геометричними параметрами. За наявності вітру полум'я буде нахилене під кутом до горизонту й матиме ті ж самі розміри. При цьому висота конвективної колонки, що утворюється продуктами згорання під час пожежі нафтопродуктів, у 20–30 разів перевищує висоту самого полум'я.

Ураховуючи ймовірність вибуху на початковій стадії пожежі, у розрахунках приймають площу пожежі, що дорівнює площі кільця, яке обмежується стінками резервуара. У нашому випадку $S_n = 346,2$ м². За критичний час пожежі для резервуару приймаємо час, протягом якого не втрачається цілісність його стінок, що в подальшому призведе до збільшення площі пожежі до площі, на яку може розлитись нафтопродукт. Для сталевих резервуарів критичне значення впливу температури на його стінки знаходиться в межах 15–20 хв, для залізобетонних – 25–30 хв. Розрахунковий час гасіння пожежі приймають рівним $\tau_{p,z} = 30$ хв [2]. Ураховуючи той факт, що пожежа може мати два варіанти розвитку (на площі поверхні кільця, що обмежується стінками резервуара, та на площі поверхні розлитого нафтопродукту, що обмежується обвалуванням) проводимо розрахунок для кожного з них.

Перший варіант розвитку пожежі (пожежа на площі поверхні резервуару, що обмежується його стінками).

Загальна площа розповсюдження продуктів згорання обмежується стінками резервуара та складає $S_n = 346,2$ м². Ураховуючи середнє значення висоти конвективної колонки $H = 25 \cdot 36,75 = 918,75$ м під час пожежі, об'єм, в якому розповсюджуються продукти згорання

над резервуаром, буде становити $V_{n,z} = S_n \cdot H = 346,2 \cdot 918,75 = 318\,071,3$ м³. При цьому слід також ураховувати швидкість вітру. За даними українського гідрометеорологічного центру на території України переважаюча швидкість вітру становить 5 м/с. Час, протягом якого виділяються продукти згорання з площі пожежі, складається з часу вільного розвитку пожежі та розрахункового часу гасіння ($\tau_{p,z} = 30$ хв). Середнє значення часу вільного розвитку пожежі можна визначити за відомою залежністю, хв.

$$\begin{aligned} \tau_{в,р} &= \tau_{в,в} + \tau_{сн} + \tau_{о,о} + \tau_{з,с} + \tau_{з,б} + \tau_{сн} + \tau_{роз} = \\ &= 1 + 3 + 1 + 1 + 1 + 4 + 7 = 18, \end{aligned}$$

де $\tau_{в,в}$ – час з моменту виникнення до моменту виявлення пожежі (приймаємо рівним $\tau_{в,в} = 1$ хв, зважаючи на її геометричні параметри розвитку на початковій стадії); $\tau_{сн}$ – час з моменту виявлення пожежі до моменту сповіщення про неї в пожежно-рятувальний підрозділ 3–4 хв. (приймаємо $\tau_{сн} = 3$ хв.); $\tau_{о,о}$ – час на отримання та опрацювання сповіщення про пожежу; $\tau_{о,о} = 1$ хв; $\tau_{з,с}$ – час на залучення сил та засобів гарнізону для гасіння пожежі; $\tau_{з,с} = 1$ хв., що враховує параметри роботи системи автоматизованого диспетчерського управління; $\tau_{з,б}$ – час збору особового складу; $\tau_{з,б} = 1$ хв.; $\tau_{сн}$ – середній час слідування на пожежу; $\tau_{сн} = 4$ хв. (при врахуванні максимального значення радіусу виїзду та середньої швидкості руху пожежного автомобіля по дорогам із твердим покриттям); $\tau_{роз}$ – час оперативного розгортання; $\tau_{роз} = 7$ хв.

Тоді час, протягом якого виділяються продукти згорання з площі пожежі, буде становити $\tau = \tau_{в,р} + \tau_{p,z} = 18 + 30 = 48$ хв. За цей час продукти згорання, що виділяються в об'ємі конвективного потоку, за даної швидкості вітру $V_v = 5$ м/с, перемістяться на відстань $l = V_v \cdot \tau = 5 \cdot 60 \cdot 48 = 14\,400$ м, при цьому об'єм продуктів згорання набуде значення $V_{n,z} = D \cdot l \cdot H = 21 \cdot 14\,400 \cdot 918,75 = 277\,830\,000$ м³.

Другий варіант розвитку пожежі (пожежа на площі поверхні розлитого нафтопродукту, що обмежується обвалуванням).

Загальну площу розповсюдження продуктів згорання приймаємо як максимально допустиму площу розливу нафтопродукту в обвалуванні при повному руйнуванні наземного резервуару з ухилом території $< 1\%$ – $S_n = 22\,500$ м² [4]. За таких умов орієнтовний радіус зони розливу складатиме $R = 85$ м [4], тоді, ураховуючи значення висоти полум'я 255 м, знаходимо висоту конвективної колонки $H = 25 \cdot 255 = 6\,375$ м та об'єм, в якому розповсюджуються продукти згорання над місцем пожежі $V_{n,z} = S_n \cdot H = 22\,500 \cdot 6\,375 = 143\,437\,500$ м³. Час, протягом якого виділяються продукти згорання з площі пожежі, буде становити, хв.

$$\tau = \tau_{в,р} + \tau_{p,z} = 17,5 + 10 = 27,5,$$

де $\tau_{в,р}$ – у даному випадку, час вільного розвитку пожежі, прирівнюємо до моменту настання критичного часу пожежі у вертикальному сталевому резервуарі (приймаємо середнє значення $\tau_{в,р} = 17,5$ хв.); $\tau_{p,z}$ – розрахунковий час гасіння пожежі розлитого нафтопродукту в межах обвалування ($\tau_{p,z} = 10$ хв.) [5]. Із урахуванням значення швидкості вітру, отримуємо об'єм продуктів згорання, м³

$$V_{n.z.} = V_{n.z.1} + V_{n.z.2} = D_1 \cdot l_1 \cdot H_1 + D_2 \cdot l_2 \cdot H_2 = 21 \cdot (5 \cdot 60 \cdot 17,5) + 170 \cdot (5 \cdot 60 \cdot 10) \cdot 6 \cdot 375 = 101 \, 292 \, 187,5 + 3 \, 251 \, 250 \, 000 = 3 \, 352 \, 542 \, 187,5$$

Маса продуктів згорання, що виділяється під час пожежі нафтопродуктів. Для визначення маси продуктів згорання використовуємо дані, наведені в роботі Чередової Т.В., при цьому швидкість вигорання нафтопродукту складатиме: для нафти $\psi_n = 0,03 \text{ кг/м}^2\cdot\text{с}$; для дизельного палива – $0,055 \text{ кг/м}^2\cdot\text{с}$; для бензину – $0,053 \text{ кг/м}^2\cdot\text{с}$. Зі збільшенням швидкості вітру до 8–10 м/с швидкість вигорання горючої рідини збільшується на 30–50% [2].

Перший варіант розвитку пожежі (пожежа на площі поверхні резервуару, що обмежується його стінками).

Протягом часу $\tau = 48 \text{ хв.}$ виділення продуктів згорання під час пожежі в резервуарі на площі $S_n = 346,2 \text{ м}^2$ до навколишнього середовища в конвективному потоці під час горіння бензину перейде продуктів згорання $m = S_n \cdot \psi_n \cdot 60 \cdot \tau = 346,2 \cdot 0,053 \cdot 60 \cdot 48 = 52 \, 844 \text{ кг.}$

На основі переліку найбільш токсичних продуктів згорання, що виділяються у процесі горіння нафтопродукту в об'ємі $V_{n.z.}$, визначаємо маси m_i для кожного з них. Для цього використовуємо параметри горючого навантаження – питомі значення L_i виділених токсичних продуктів згорання від бензину: діоксиду вуглецю, оксиду вуглецю, оксидів азоту, синильної кислоти, а також споживання кисню [6].

У випадку пожежі на поверхні резервуару m_i токсичного продукту згорання складатиме, кг:

- діоксиду вуглецю $m_{CO_2} = mL_{CO_2} = 52 \, 844 \cdot 2,92 = 154 \, 304,5;$
- оксиду вуглецю $m_{CO} = mL_{CO} = 52 \, 844 \cdot 0,175 = 9 \, 247,7;$
- оксидів азоту $m_{NO_x} = mL_{NO_x} = 52 \, 844 \cdot 0,003 = 158,5;$
- синильної кислоти $m_{HCN} = mL_{HCN} = 52 \, 844 \cdot 0,015 = 792,7;$
- споживання кисню $m_{O_2} = mL_{O_2} = 52 \, 844 \cdot (-3,41) = -180 \, 198.$

Другий варіант розвитку пожежі (пожежа на площі поверхні розлитого нафтопродукту, що обмежується обвалуванням).

Для пожежі по площі розлитого нафтопродукту в обвалуванні $S_n = 22 \, 500 \text{ м}^2$, протягом часу виділення продуктів згорання $\tau = 27,5 \text{ хв.}$, до навколишнього середовища в конвективному потоці під час горіння бензину перейде продуктів згорання, загальна маса яких буде складатись із маси m_1 виділених продуктів згорання протягом часу до настання його критичного значення для РВС-5000 та розрахункового часу гасіння пожежі в обвалуванні – m_2 ,

$$m = m_1 + m_2 = S_{n1} \cdot \psi_n \cdot \tau_1 + S_{n2} \cdot \psi_n \cdot \tau_2 = 346,2 \cdot 3,18 \cdot 17,5 + 22 \, 500 \cdot 3,18 \cdot 10 = 19 \, 266 + 715 \, 500 = 734 \, 766 \text{ кг.}$$

Під час пожежі на поверхні розлитого нафтопродукту m_i токсичного продукту згорання складатиме, кг:

- діоксиду вуглецю $m_{CO_2} = mL_{CO_2} = 734 \, 766 \cdot 2,92 = 2 \, 145 \, 516,7;$
- оксиду вуглецю $m_{CO} = mL_{CO} = 734 \, 766 \cdot 0,175 = 128 \, 584;$
- оксидів азоту $m_{NO_x} = mL_{NO_x} = 734 \, 766 \cdot 0,003 = 2 \, 204,3;$

- синильної кислоти $m_{HCN} = mL_{HCN} = 734 \, 766 \cdot 0,015 = 11 \, 021,5;$
- споживання кисню $m_{O_2} = mL_{O_2} = 734 \, 766 \cdot (-3,41) = -2 \, 505 \, 552.$

Концентрація токсичних продуктів згорання в об'ємі конвективного потоку та її порівняння з гранично допустимими значеннями.

Перший варіант розвитку пожежі (пожежа на площі поверхні резервуару, що обмежується його стінками). Визначаємо концентрацію токсичних продуктів згорання у г/м^3 , що виділяються в об'ємі конвективного потоку $V_{n.z.}$ за залежністю, г/м^3 :

$$K_i = \frac{10^3 \cdot m_i}{V_{n.z.}}$$

та порівнюємо з гранично допустимими значеннями за першим варіантом:

- $K_{CO_2} = 0,56 \text{ г/м}^3 < [K_{CO_2}] = 110;$
- $K_{CO} = 0,03 \text{ г/м}^3 < [K_{CO}] = 1,16;$
- $K_{NO_x} = 0,57 \cdot 10^{-3} \text{ г/м}^3 < [K_{NO_x}] = 0,2;$
- $K_{HCN} = 0,29 \cdot 10^{-2} \text{ г/м}^3 < [K_{HCN}] = 0,1;$

зменшення густини кисню, г/м^3 :

$$\rho_{O_2} = 270 - \frac{180 \, 198 \cdot 10^3}{277 \, 830 \, 000} = 269,4 \text{ г/м}^3 > [\rho_{O_2}] = 226;$$

оптична густина диму μ , Нп/м

$$\mu = \frac{c_p \rho_0 T_0 D}{Q_{min} \eta (1-\varphi)} \left[1 - \exp \left(- \frac{\psi_n S_n \eta Q_{min} (1-\varphi)}{c_p \rho_0 T_0 V} \tau \right) \right],$$

де $c_p \approx 10^3 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}^{-1}$ – ізобарна теплоємність газового середовища; $\rho_0 T_0 \approx 3 \cdot 10^2 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{К}$; $\eta \approx 1$ – коефіцієнт повноти згорання; значення $\varphi \approx 0,5$ – коефіцієнт тепловтрат; Q_{min} – найнижча теплота згорання, Дж/кг ; ψ_n – питома швидкість вигорання, $\text{кг/м}^2\cdot\text{с}$; D – димоутворююча здатність, $\text{Нп} \cdot \text{м}^2/\text{кг}$, наведені в ГОСТ 12.1.004 – 91 (додаток 4);

$$\mu = \frac{10^3 \cdot 3 \cdot 10^2 \cdot 256}{432 \cdot 10^5 \cdot 1 \cdot (1-0,5)} \times \left[1 - \exp \times \left(- \frac{0,0585 \cdot 346,2 \cdot 1 \cdot 432 \cdot 10^5 \cdot (1-0,5)}{10^3 \cdot 3 \cdot 10^2 \cdot 277 \, 830 \, 000} \cdot 48 \times \times 60 \right) \right] = 0,05,$$

де $\mu = 0,05 \text{ Нп/м} < [\mu] = 1,2 \text{ Нп/м}$, що відповідає значенню граничної видимості $l_{cp} = 2,38/\mu = 2,38/0,05 = 47,6 \text{ м.}$

Другий варіант розвитку пожежі (пожежа на площі поверхні розлитого нафтопродукту, що обмежується обвалуванням).

У процесі порівняння концентрації токсичних продуктів згорання, що виділяються в об'ємі конвективного потоку під час пожежі на площі розлитого нафтопродукту з гранично допустимими значеннями, отримуємо наступні результати, г/м^3 :

- $K_{CO_2} = 0,64 \text{ г/м}^3 < [K_{CO_2}] = 110;$
- $K_{CO} = 0,04 \text{ г/м}^3 < [K_{CO}] = 1,16;$
- $K_{NO_x} = 0,66 \cdot 10^{-3} \text{ г/м}^3 < [K_{NO_x}] = 0,2;$
- $K_{HCN} = 0,33 \cdot 10^{-2} \text{ г/м}^3 < [K_{HCN}] = 0,1;$

$$- \rho_{O_2} = 270 - \frac{2 \, 505 \, 552 \cdot 10^3}{3 \, 352 \, 542 \, 187,5} = 269,3 \text{ г/м}^3 > [\rho_{O_2}] = 226.$$

$$\mu_1 = \frac{10^3 \cdot 3 \cdot 10^2 \cdot 256}{432 \cdot 10^5 \cdot 1 \cdot (1-0,5)} \times \left[1 - \exp \left(- \frac{0,0585 \cdot 346,2 \cdot 1 \cdot 432 \cdot 10^5 \cdot (1-0,5)}{10^3 \cdot 3 \cdot 10^2 \cdot 101 \, 292 \, 187,5} \cdot 17,5 \cdot \times 60 \right) \right] =$$

$$\mu_2 = \frac{10^3 \cdot 3 \cdot 10^2 \cdot 256}{432 \cdot 10^5 \cdot 1 \cdot (1-0,5)} \times \left[1 - \exp\left(-\frac{0,0585 \cdot 22500 \cdot 1 \cdot 432 \cdot 10^5 \cdot (1-0,5)}{10^3 \cdot 3 \cdot 10^2 \cdot 3352,542 \cdot 187,5} \cdot 10 \times 60\right)\right] = 0,55,$$

де $\mu_1 = 0,05 \text{ Hn/m} < [\mu] = 1,2 \text{ Hn/m}$, що відповідає значенню граничної видимості $l_{gp} = 2,38/\mu = 2,38 / 0,05 = 47,6 \text{ м}$ у перші 17,5 хв. розвитку пожежі; $\mu_2 = 0,55 \text{ Hn/m} < [\mu] = 1,2 \text{ Hn/m}$, що відповідає значенню граничної видимості $l_{gp} = 2,38/\mu = 2,38/0,55 = 4,3 \text{ м}$ в наступні 10 хв. гасіння пожежі.

Отримані результати розрахунків дозволяють стверджувати, що кількість виділених токсичних продуктів згорання, які викидаються до атмосферного повітря в конвективному потоці під час процесу горіння нафтопродукту, залежить від площі пожежі та швидкості вітру, на який ми не можемо впливати. Найгірша ситуація спостерігається у випадку втрати цілісності резервуару, тобто під час його вибуху або настання критичного часу без охолодження стінок резервуару, та розлиття нафтопродукту по площі обвалування. Можливі й гірші наслідки розвитку пожежі. Так, наприклад, унаслідок пожежі, що виникла 16 червня 2005 року в 05 год 40 хв. на території нафтобази ВАТ „НАФТО-СЕРВІС“ у м. Ногінськ Московської обл. було зруйновано декілька резервуарів: два об'ємом по 5000 м³, та один – 1000 м³ та дві цистерни на під'їзних шляхах. Два працівники нафтобази загинули, близько 800 чоловік евакуйовані із сусіднього району. До ліквідації пожежі залучалось двадцять три відділення пожежно-рятувальних підрозділів, два пожежних потяги та пожежний гелікоптер.

Ураховуючи дані статистики, виникнення пожеж на складах нафти й нафтопродуктів у період з 2004 по 2011 рік (дані статистики використовуються для порівняння, не враховують 2012–2013 роки, оскільки на момент написання роботи відсутня національна доповідь за даний період про стан навколишнього природного середовища в Україні), можемо визначити загальну кількість токсичних продуктів згорання, що виділились у конвективному потоці під час пожеж у резервуарах РВС-5000, кг

$$M = k \cdot n \cdot m = 0,32 \cdot 11 \cdot 734\,766 = 2\,586\,376,32,$$

де k – коефіцієнт пропорційності; $k = 0,32$; n – загальна кількість пожеж, що виникли на складах нафти й нафтопродуктів у період з 2004 по 2011 рік на території України; $n = 11$; m – маса продуктів згорання, що виділяється під час пожежі на площі розлитого нафтопродукту в межах обвалування з резервуару РВС-5000.

Якщо порівнювати отримане значення з викидами забруднюючих речовин до атмосферного повітря України протягом цього ж періоду, частка виділених продуктів згорання внаслідок пожеж на складах нафти та нафтопродуктів становитиме 0,005% від загальної кількості. При цьому за викид основних токсичних продуктів згорання до атмосфери внаслідок пожеж на складах нафти й нафтопродуктів (оксид вуглецю, оксид азоту) підприємства сплатили збір за забруднення навколишнього природного середовища в розмірі 68,2 тис. грн, що розрахований у відповідності до інструкції про порядок обчислення та сплати збору за забруднення навколишнього природного середовища.

За даними Міністерства екології та природних ресурсів у 2011 році на території України з метою охорони атмосферного повітря на відповідні заходи підприємствами було витрачено 918 млн грн, що дозволило зменшити викиди забруднюючих речовин до атмосферного повітря на 55,7 тис. т., що становили 0,8% від їх загальної кількості.

Зменшити кількість токсичних продуктів згорання, що виділяються в конвективному потоці під час пожеж нафтопродукту, можливо за рахунок впровадження на складах зберігання нафти та нафтопродуктів високоефективних протипожежних заходів. Впровадження таких заходів на об'єкті є необхідним для зменшення забруднення навколишнього природного середовища, незважаючи на те, що викид даних токсичних речовин не перевищує гранично допустимого значення на одну пожежу та обумовлюється економічним ефектом від його впровадження.

У залежності від категорії об'єктів зберігання нафти та нафтопродуктів, місткості резервуарів можуть запроваджуватись наступні протипожежні заходи:

- стаціонарно встановлені піноутворюючі пристрої (піногенератори) у верхньому поясі стінки резервуару при гасінні на шар рідини;
- стаціонарні вводи пінопроводів у нижньому поясі стінки резервуару при гасінні під шар рідини;
- стаціонарні установки охолодження;
- первинні засоби пожежогасіння;
- запас піноутворювача та протипожежне водопостачання (внутрішнє та зовнішнє).

Для приміщень складів нафти та нафтопродуктів передбачається встановлення засобів зв'язку, пожежної та охоронної сигналізації.

Якщо проводити порівняння між існуючими способами гасіння пожежі в резервуарі з використанням стаціонарних установок автоматичного (неавтоматичного) пожежогасіння, то, у даному випадку, більш ефективним є спосіб гасіння під шар піни. Це реалізується за рахунок захищеності піногенераторів і пінопроводів від вибуху пароповітряної суміші. Розглянемо даний спосіб гасіння більш детально.

Система підшарового пожежогасіння забезпечує оперативне гасіння пожежі шляхом утворення на поверхні нафтопродукту вогнестійкої самозатягуючої плівки за рахунок спливання до верхньої частини маленьких бульбашок піни низької кратності, що перекривають доступ кисню до зони горіння. Для даної системи використовується піноутворювач спеціального призначення – фторсинтетичний плівкоутворюючий піноутворювач. Система підшарового пожежогасіння після 14 хвилин вільного розвитку пожежі успішно ліквідує загорання менше ніж за 8 хв., що доведено за результатами проведених досліджень у резервуарах ємністю 1000 та 10000 м³ [7]. Автоматичний сигнал на подачу піни подається від термочутливого давача, що встановлюється у верхньому поясі резервуару. Система підшарового пожежогасіння може бути повністю автоматизована або працювати в комплексі із залученням пожежно-рятувальної техніки.

Переваги системи підшарового пожежогасіння [8]:

- забезпечує оперативне гасіння пожежі;

- дозволяє різко знизити температуру нафтопродукту незалежно від діаметра резервуару, що захищається;
- ефективна за наявності ізольованих просторів – „карманів“, що можуть утворюватися при деформації стінок, обваленні даху резервуару, слученні понтона;
- активність вогнегасячої дії системи підшарового пожежогасіння не залежить від часу розвитку пожежі, оскільки піна низької кратності вводиться до холодного, нижнього шару нафтопродукту в резервуарі;
- напірні вузли, у тому числі баки-дозатори, пожежно-рятувальні автомобілі, необхідні для забезпечення роботи системи, розміщуються за межами обвалування.

Економічний ефект від запровадження системи підшарового пожежогасіння визначається інертністю її спрацювання та, в основному, досягається за рахунок зменшення площі пожежі, що, у свою чергу, зменшує прямі матеріальні збитки та кількість продуктів згорання, які виділяються з даної площі. Інертність системи залежить від наступних часових періодів (у випадку залучення пожежно-рятувальної техніки):

- часу, що витрачається на збір і виїзд особового складу добровільної пожежної команди – у межах 1 хв. [5];
- часу, що витрачається на подолання відстані від пожежного депо до місця виклику – до 4 хв. (при врахуванні максимального значення радіуса виїзду та середньої швидкості руху пожежного автомобіля по дорогам із твердим покриттям);
- часу, що витрачається на оперативне розгортання – у межах 6–8 хв. [5];
- часу проходження піни від піногенератора до поверхні резервуару – 40–60 с [8].

Таким чином, загальний час інертності спрацювання системи підшарового пожежогасіння коливається в межах 12–14 хв, що підтверджується експериментальними даними та не перевищує критичний час розвитку пожежі у вертикальному сталевому резервуарі. Це дозволяє втримати пожежу на площі резервуару, що обмежується його стінками, відповідно, зменшити кількість викидів токсичних продуктів згорання на 54,2% із розрахунку на одну пожежу. Такий результат отримуємо із різниці між масою виділених токсичних продуктів згорання $m_1 = 346,2 \cdot 0,053 \cdot 60 \cdot 48 = 52\,844$ кг з площі пожежі, що обмежується стінками резервуару за час $\tau = 48$ хв та масою токсичних продуктів згорання $m_2 = 346,2 \cdot 0,053 \cdot 60 \cdot 22 = 24\,220,2$ кг, що виділяються за період інертності спрацювання й гасіння пожежі системою підшарового пожежогасіння $\tau = 14 + 8 = 22$ хв (час припинення горіння при використанні системи підшарового пожежогасіння – 2–8 хв [7, 8]), кг

$$m = m_1 - m_2 = 52\,844 - 24\,220,2 = 28\,623,8.$$

Це дозволяє скоротити витрати об'єкта на сплату збору за забруднення навколишнього природного середовища в розмірі 1523,4 грн.

Висновки.

1. Кількість виділених токсичних продуктів згорання, що викидаються до атмосферного повітря в конвективному потоці під час процесу горіння нафтопродукту, прямо пропорційно залежить від площі пожежі, яка є функцією її критичного часу.

2. Зменшення викидів токсичних продуктів згорання можливе за рахунок впровадження на складах нафти та нафтопродуктів високоефективних протипожежних заходів, як, приклад, розглянута в роботі система підшарового пожежогасіння.

3. Впровадження системи підшарового пожежогасіння для резервуарів типу РВС-5000 дозволяє зменшити викиди токсичних продуктів згорання на 54,2% на одну пожежу.

Список літератури / References

1. Руководство по безопасности „Методика оценки риска аварий на опасных производственных объектах нефтегазоперерабатывающей, нефте- и газохимической промышленности“. Серия 09. / Колл. авт. – М. : Закрытое акционерное общество „Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности“, 2014. – Выпуск 38. – 44 с.

Safety Guide (2014), “Methods of assessing risk of accidents at hazardous production facilities of oil and gas refining, and oil and gas chemical industries”, Series 09. Issue 38, Coll. Auth., Closed Joint Stock Company “Scientific and Technical Research Center of Industrial Safety”, Moscow, Russia.

2. Інструкція щодо гасіння пожеж у резервуарах із нафтою та нафтопродуктами: НАПБ 05.035-2004 / затверджена наказом МНС України від 16.02.2004 № 75.

Instructions on fire extinguishing in tanks with oil and petroleum products: NAPB 05.035-2004 approved by Ministry of Emergency Situation of Ukraine, Order no. 75, valid since February 16, 2004.

3. Деякі проблемні питання системи протипожежного захисту нафтопереробних підприємств [Електронний ресурс] / В.А. Свиридов, В.В. Присяжнюк, С.Д. Кухарішин, М.Л. Якіменко – Режим доступу: <http://www.undicz.mns.gov.ua/news/162.html>.

Sviridov, V.A. (1994), “Some problem areas of the system of fire protection refineries”, available at: <http://www.undicz.mns.gov.ua/news/162.html>.

4. Рекомендации по обеспечению пожарной безопасности объектов нефтепродуктообеспечения, расположенных на селитебной территории [Электронный ресурс] – М.: ВНИИПО, 1997. – 23 с. – Режим доступа: <http://www.gosthelp.ru/text/Rekomendaciipoobespecheni2.html>.

“Recommendations on fire safety of petroleum products located in residential areas”, (1997), VNIPO, available at: <http://www.gosthelp.ru/text/Rekomendaciipoobespecheni2.html>.

5. Пархоменко Р.В. Пожежна тактика: Практикум. Вид. 2-ге / Пархоменко Р.В., Болібрех Б.В., Чалий Д.О. – Кам'янець-Подільський: ПП „Медобори-2006”, 2013. – 416 с.

Parkhomenko, R.V., Bolibrukh, B.V. and Chalyi, D.O. (2013), *Pozharnaya taktika* [Fire-Fighting Tactics], PP “Medobory 2006”, Kamyanets-Podolskiy, Ukraine.

6. Пузач С.В. Методы расчета тепломассообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности : монография / Пузач С.В. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2005. – 336 с.

Puzach, S.V. (2005), *Metody rascheta teplomassoobmena pri pozhare v pomeshchenii i ikh primeneniye pri reshenii prakticheskikh zadach pozharovzryvobezopasnosti* [Methods of Calculation of Heat Transfer in a Fire Inside Buildings and Application of the Methods for Solving Practical Problems of Fire-Explosion Safety], Monograph, Academy of Russian Ministry for Emergency Situations, Moscow, Russia.

7. Система подслоного тушения пожаров в резервуарах с легковоспламеняющимися жидкостями [Электронный ресурс]. – НПО „Сибирский машиностроитель“, 2014. – 19 с. – Режим доступа: <http://pojkom.spb.ru/pdf/8-sistemi-podsloynogo-pozharotusheniya.pdf>.

ASPI PozhKomplekt Website, “Sublayer fire extinguishing system in the tanks with flammable liquids”, (2014), available at: <http://pojkom.spb.ru/pdf/8-sistemi-podsloynogo-pozharotusheniya.pdf>.

8. Система подслоного пожаротушения [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.himstalcon.ru/node/2157>.

ООО Khimstalkon-Inzhiniring Website, “Subsurface fire system”, available at: <http://www.himstalcon.ru/node/2157>.

Цель. На основе результатов теоретических и экспериментальных исследований предложить метод, который позволит установить зависимость между площадью пожара и количеством выбросов токсичных продуктов сгорания во время его возникновения на объектах хранения нефти и нефтепродуктов, уменьшить количество выбросов за счет внедрения высокоэффективных инженерно-технических противопожарных мероприятий.

Методика. Для решения данной задачи за основу была принята методика расчета сил и средств для тушения пожаров в резервуарах. Предметом исследования является площадь пожара в вертикальном стальном резервуаре РВС-5000 и количество токсичных продуктов сгорания, которое выделяется в конвективном потоке вследствие возможного пожара.

Определение загрязнения продуктами сгорания окружающей среды проводили с использованием зависимостей, включающих удельные значения возможных выбросов токсичных продуктов (стехиометрические коэффициенты). Влияние на значение каждого показателя в сторону его уменьшения достигнуто за счет внедрения высокоэффективных инженерно-технических противопожарных мероприятий.

Результаты. Дают возможность проводить мониторинг объектов хранения нефти и нефтепродуктов с точки зрения экологической безопасности и осуществлять управление ею. Кроме того, с использованием предложенных зависимостей, возможно определять количественные составляющие выбросов токсичных продуктов сгорания, которые выделяются во время процесса горения в окружающую среду на объектах хранения нефти и нефтепродуктов.

Научная новизна. Разработана методология определения количественного показателя экологического загрязнения токсичными продуктами сгорания окружающей среды от пожаров на объектах хранения нефти и

нефтепродуктов с учетом погодных условий и среды пространственного распространения.

Практическая значимость. Результаты работы рекомендуются для внедрения в практику эксплуатации объектов хранения нефти и нефтепродуктов, в практику административно-хозяйственного управления этими объектами с целью обеспечения пожарной и экологической безопасности, а также в практику деятельности научно-исследовательских и проектно-конструкторских учреждений при проектировании данных объектов и в учебный процесс высших технических учебных заведений при изучении дисциплин пожарного и экологического направления.

Ключевые слова: пожарная, экологическая безопасность, токсичные продукты сгорания, инженерно-технические противопожарные мероприятия

Purpose. To suggest a method, supported by theoretical and experimental studies, for determination of the relationship between the area of the fire and the amount of emissions of toxic combustion products during fire cases at the sites of storage of petroleum and its products. To reduce emissions by implementing highly effective engineering fire protection.

Methodology. The method of calculation of capabilities for fighting fires in tanks has been adopted to solve this problem. The subject of the research is the area of the fire in the vertical steel tanks РВС-5000 and the amount of toxic combustion products released in the convective flow due to a possible fire.

The environmental pollution with combustion products was determined by the dependencies that included specific values of possible emission of toxic products (stoichiometric coefficients). We have managed to reduce the values of each parameter through implementation of highly effective engineering and technical fire prevention measures.

Findings. The results received allow monitoring and controlling the environmental safety at the sites of storage of petroleum and its products. In addition, the proposed dependencies allow determining the quantitative composition of toxic combustion products released into the environment during the fire at the sites of storage of petroleum and its products.

Originality. The methodology of the environmental pollution scoring during fire cases at the sites of storage of petroleum and its products considering weather conditions and combustion products spread.

Practical value. The results are recommended for implementation in the operating practice of storage of petroleum and petroleum products and administrative management at these facilities to provide fire and environmental safety. It may be used by research and design institutions for design of the objects of storage of petroleum and petroleum products and by higher technical schools in educational process in studies of disciplines concerning fire-fighting and ecology.

Keywords: fire safety, ecological safety, toxic products of combustion, engineering fire prevention measures

Рекомендовано до публікації докт. с.-г. наук В.П. Кучерявим. Дата надходження рукопису 09.05.14.