

УДК 614.84

DOI: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2024.8.1.49.60>

Марія КУЦЕНКО, кандидат економічних наук, доцент (ORCID 0000-0001-6879-9187),
Георгій ЄЛАГІН, кандидат хімічних наук, старший науковий співробітник
(ORCID 0000-0003-2577-6430),
Анатолій АЛЕКСЄЄВ, кандидат хімічних наук, доцент (ORCID 0000-0003-4114-5807),
Олена АЛЕКСЄЄВА, кандидат технічних наук, доцент (ORCID 0000-0003-0119-4081),
Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля
Національного університету цивільного захисту України

ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ ГОРЮЧИХ РІДИН, РОЗЛИТИХ НА ПОВЕРХНІ ВОДОЙМ

Проведено аналіз потенціальних втрат від шкоди навколишньому середовищу і витрат на гасіння пожежі при пожежах горючих рідин, розлитих на поверхні водойми. Запропонована модель пожежі на поверхні водойми і розглянуті різні варіанти припинення горіння, в тому числі пористим носієм з адсорбованими в порах вогнегасними солями.

Знайдено, що при гасінні таких пожеж із застосуванням засобів на основі пористого носія з адсорбованими в порах вогнегасними солями дозволить суттєво знизити суму екологічних втрат і витрат на гасінні пожежі по відношенню до гасіння пожеж іншими засобами.

Ключові слова: *техніко-економічний аналіз, горіння рідин, матеріальні втрати, екологічні втрати, витрати на гасіння, інгібування, носії, вогнегасні солі, іммобілізація.*

Постановка проблеми. Сучасний світ неможливо уявити без нафти та продуктів її переробки. Тим часом, і сама нафта і продукти її переробки відносяться до особливо небезпечних горючих рідин. При необережному поводженні з ними, а найчастіше під час транспортування, вони виливаються з ємностей і розливаються на значних поверхнях. До найбільш дешевих видів транспорту відноситься транспорт водний. За один рейс танкер перевозить тисячі тон нафти або її похідних. Аварія такого танкера викликає широкий суспільний резонанс, тому спричинення такої аварії вельми приваблює терористів різних ідеологій. Відбуваються і аварії, викликані природними причинами або просто недбалим поводженням з цими особливо небезпечними речовинами. Отруєння поверхні водойми та поверхневих шарів води згубно діє не лише на флору та фауну водойми а і на ареал навколо неї. Смертельного отруєння зазнають і безпосередньо мешканці водного басейну і птахи, що харчуються біля водойми. В таких районах на довгі місяці, а то і роки, припиняються господарська діяльність на узбережжі і рибний промисел.

В переважній більшості випадків, особливо при терористичних актах, вилив такої рідини ще й супроводжується її загоранням. Пожежі, які тут виникають, продовжуються тижнями, а іноді й місяцями, і приводять до значних матеріальних збитків та погіршення екологічної ситуації не тільки у водоймі, а і в повітрі над нею і над узбережжям. Горіння таких рідин продукує велику кількість продуктів згорання. Причому, у випадку самої нафти, ще й продуктів неповного згорання і мазутоподібних залишків. Серед таких продуктів [1,2]:

- вуглекислий газ, який сприяє глобальному потеплінню;
- чадний газ, отруйний для людей та тварин;

- дим, що являє собою завис у газоподібних продуктах згорання незгорілих твердих та рідких частинок і знижує прозорість атмосфери та має канцерогенні властивості;

- інші продукти неповного згорання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Мазутоподібні залишки неповного згорання нафти утворюють суміш мазуту з бітумом, з густиною, яка близька до густини морської води. Утворена суміш опускається в товщу води і плаває недалеко від її поверхні. Вона може переміщуватися на великі відстані та існувати тривалий час, створюючи небезпеку для морських тварин та планктону [2, 3].

Для збирання розлитої нафти розроблені декілька способів, але для збирання мазутоподібних залишків вони непридатні. Ну, і у будь-якому випадку, перед тим, як збирати залишки незгорілого продукту і проводити заходи із ліквідації наслідків пожежі, пожежу треба загасити. Між тим, гасіння пожеж вуглеводнів, розлитих на поверхні водойми, являє дуже складну задачу. У більшості випадків такі пожежі закінчуються лише при вигоранні переважної більшості горючої речовини. В оточуюче середовище при цьому викидається велика кількість шкідливих продуктів повного і неповного спалювання, а практично весь вантаж втрачається [4].

Засоби збирання з поверхні водойми залишків вуглеводню, який не згорів, дозволяють врятувати лише малу частку цього вантажу. До того ж, зібрана горюча рідина перемішана з великою кількістю води, і доведення її до товарного вигляду вимагає наступної сепарації і осушування. Збирання, сепарація і осушування супроводжуються такими витратами, що, з точки зору лише подальшого використання вуглеводнів, при малих розливах вони здебільшого недоцільні. Зрозуміло, і в цьому випадку збирання зменшує екологічну шкоду для довкілля, і проводити його необхідно. Починати ж операції зі збирання і сепарації незгорілих залишків можна лише після припинення горіння. І чим раніше пожежу буде ліквідовано, тим більша частка продукту може бути відновленою, і тим меншої шкоди зазнає оточуюче середовище.

Для гасіння пожеж використовуються засоби, в основі яких лежать чотири фізико-хімічні механізми дії: охолодження зони горіння, флегматизація горючої суміші (розведення її інертними газами), ізоляція зони горіння від доступу повітря і від доступу горючих парів, інгібування процесу горіння вилученням з нього активних частинок горіння. Але при гасінні пожеж горючих рідин, що розлиті на поверхні водойми, деякі з них взагалі непридатні, а інші мають низьку ефективність, велику вартість і, як правило, погано впливають на оточуюче середовище.

Охолоджуючий засіб (воду) для гасіння пожеж розлитих горючих рідин застосовувати неможливо, так як питома густина цих рідин менша за питому густину води. Вода перемішує поверхневий шар і сприяє його розтіканню і поширенню пожежі.

Для застосування флегматизуючого засобу (інертного газу) необхідно створити дуже значну його концентрацію, чого на відкритих просторах досягти неможливо.

На сьогодні найбільш ефективними засобами гасіння пожежі вважаються засоби інгібуючі. За таким механізмом припиняють горіння хладони та вогнегасячі порошкові композиції. Їх переваги – придатність для гасіння пожеж будь-якого класу і менша, порівняно з іншими засобами, витрата.

Але застосування хладонів має серйозні недоліки. Хладони – це галогеновмісні похідні нижчих вуглеводнів. За нормальних умов вони знаходяться у газоподібному стані або у стані рідини з низькою температурою кипіння. Як і у випадку з інертними газами, створити потрібну їх концентрацію на відкритому просторі неможливо. Крім того, хладони – речовини токсичні самі по собі і при пожежі розкладаються, утворюючи токсичні галогеноводні. До того ж, в останні десятиріччя галогеновмісні похідні визнано відповідальними за руйнування озонового шару атмосфери. За

Монреальським протоколом, який визнано більшістю розвинених країн, виробництво і застосування таких сполук рекомендовано заборонити. На жаль, не всі держави дотримуються цих рекомендацій, тому кількість хладонів в атмосфері продовжує збільшуватися [5]. Комбіновані засоби гасіння пожежі, наприклад, порошки «СІ», які складаються з носія, просоченого хладонами, мають такі самі недоліки. Нові плівкоутворюючі галогеновмісні сполуки самі нелетучі, але під дією вогню вони розкладаються. При цьому у повітря виділяються ті самі галогеноводні.

У загальному випадку найменшої шкоди навколишньому середовищу завдає гасіння пожеж порошковими засобами. Ці засоби складаються із солі, що володіє вогнегасними властивостями, та добавок інших солей. Тут використовуються амоній фосфати, калій карбонат, натрій бікарбонат і ін. Практично всі компоненти порошкових засобів гасіння пожеж є ні чим іншим, як мінеральними добривами. Їх залишки ані ґрунт, ані воду не отруюють. Правда, підібрати оптимальні розміри частинок порошкового засобу дуже важко. З одного боку, чим менші розміри мають його частинки, чим більша їх сумарна поверхня, тим засіб ефективніший. З другого ж боку, занадто дрібний порошок не в змозі пройти до зони горіння крізь конвективні потоки продуктів згорання. Він відноситься, не встигаючи завадити горінню. Крім того, при виробництві дуже дрібних порошків виникають технологічні труднощі. Зберігатися без злежування може лише сухий порошок. Висушування проводять у повітряному потоці з наступним відділенням порошку від повітря на циклонах або фільтрах різних конструкцій. Дуже дрібні частинки здатні проскакувати крізь усі фільтри. Тим не менше, значні переваги гасіння пожеж порошковими засобами перед застосуванням інших засобів примушують миритися з цими недоліками.

На жаль, гасіння пожеж горючих рідин, особливо при розливі їх на поверхні водоймищ, відомими порошками виглядає проблематичним. Зона горіння рідини розташована безпосередньо над її поверхнею. Отже, вогнегасний засіб, нанесений на певну ділянку поверхні, повинен знаходитися на цій поверхні час, достатній для подачі порцій порошку на сусідні ділянки. Порошкові ж композиції складаються з солей, які мають питому густину більшу, ніж питома густина розливої горючої рідини і питома густина води. Це означає, що порошок швидко зануриться під поверхню. І оброблена ділянка за кілька секунд знов стане беззахисною. При великій площі пожежі за такий проміжок часу обробити і сусідні ділянки, або подати порошок одночасно на всю поверхню неможливо. Тому сусідні ділянки стають джерелом вторинного підпалювання.

На практиці для гасіння пожеж горючих рідин здебільшого використовують ізоляційні засоби гасіння, в першу чергу повітряно-механічні піни. Пожежна піна середньої стійкості здатна триматися на поверхні рідини протягом 10 хвилин і більше. За цей час нові порції можна подати на сусідні ділянки. Піна розтікається по поверхні і поступово відвойовує в пожежі ділянку за ділянкою, не дозволяючи повторного підпалювання. Але в умовах гасіння пожеж рідин, розлитих на великих площинах поверхні моря чи океану, тут теж виникають труднощі. Піну, особливо високократну, легку, важко подати на значну відстань. Гасіння піною вимагає досить складного, громіздкого і дорогого обладнання. При гасінні пожеж піна витрачається сотнями літрів, для чого необхідні великі кількості достатньо дорогих піноутворювачів. І, головне, сучасні піноутворювачі у більшості випадків мають синтетичну природу. Вони отруюють оточуюче середовище і шкідливі для персоналу, який з ними працює. Потрапляючи до води, піноутворювачі змінюють її поверхневий натяг, що шкідливо впливає на умови дихання живих істот водойми і призводить до їх масової загибелі. Крім того, піноутворювачі мають властивості емульгаторів і сприяють утворенню емульсії нафти у морській воді. Це, в свою чергу, згубно діє на живі істоти, а в подальшому суттєво заважає сепарації.

В ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля проводяться дослідження зі створення принципово нових вогнегасних засобів. Вони являють собою високопористі носії з іммобілізованими на внутрішній поверхні цих пор вогнегасячими солями [6–15]. Невисока насипна маса засобу дозволяє йому постійно знаходитись на поверхні і води і горючої рідини, тобто в зоні горіння. Фізико-хімічний механізм їх дії, інгібування горіння, вимагає менших, порівняно з іншими засобами, витрат. Складаються такі засоби виключно з нешкідливих для оточуючого середовища і відносно недорогих речовин. Технологія ж виготовлення нових засобів відзначається простотою і не вимагає складного обладнання.

Формулювання цілей дослідження. В даній статті на моделі горіння нафти, розлитої на поверхні водойми, проведено порівняльну оцінку втрат (в грошовому обчисленні) від цієї пожежі і витрат на її гасіння при умові згасання пожежі догоранням, при умові гасіння її повітряно-механічною піною та при умові гасіння засобами на основі високопористих носіїв з іммобілізованими вогнегасячими солями.

Методи дослідження. За модель прийнято горіння нафти, що виливається з танкера загального призначення. Аварії з виливом і загоранням нафти зазнав танкер, який перевозив 20 тисяч тон нафти. В якості прикладу обрано нафту середнього складу, яка містить [16]: 84,33% карбону; 3,5% сірки; 11,93% гідрогену; 0,2% нітрогену та 0,04% кисню. За умовами моделі танкер було пошкоджено, нафта розлилася на поверхню водойми на площу $500 \times 500 = 250000$ кв. м шаром товщиною в 0,1 м і загорілася. Розглянуто сім випадків: 1) пожежа припинилася лише після повного вигорання легких фракцій, залишивши 5% у вигляді емульсії мазуту; 2–4) пожежу вдалося загасити із застосуванням повітряно-механічної піни після вигорання 20%, 50% та 90% нафти; 5–7) пожежу вдалося загасити після вигорання тих же 20%, 50% та 90% нафти із застосуванням засобу на основі високопористого носія (тирси деревини), іммобілізованого діаммонійфосфатом. Тобто, в останніх 6 випадках до водного середовища потрапили відповідно 16 тис. т, 10 тис. т та 2 тис. т цієї нафти і підрахована кількість вогнегасного засобу. Проведено порівняння суми безпосередньо матеріальних втрат і витрат, пов'язаних зі шкодою для оточуючого середовища, з витратами на виготовлення вогнегасних засобів (без урахування витрат на їх доставку, які прийняті однаковими).

Втрати від пожежі оцінювалися за трьома складовими: вартість продукту, який вдалося врятувати; вартість самого засобу і шкода (в грошовому обчисленні) оточуючому середовищу. В останньому випадку враховувалася і шкода, яку завдає сам вогнегасний засіб. Розрахунки матеріальних втрат базувалися на середній вартості нафти на перше червня 2023 року. Екологічні втрати (в грошовому обчисленні) обчислювалися згідно інструкції «Про порядок обчислення та сплати збору за забруднення навколишнього середовища», за формулою:

$$A_{\phi} = M_i \times H_3 \times A_i \times K_T \times K_{zi} \quad (1)$$

Виклад основного матеріалу дослідження

Матеріальні втрати

На 01.06.2023 р. вартість сирової нафти в середньому становила \$87 за барель, тобто ~ за 160 л, або ~ за 140 кг. Отже, при повному вигоранні 20 тис. т нафти матеріальні втрати досягли б: $20 \cdot 10^6 \times 87 : 140 = \$12,4 \cdot 10^6$, що згідно з курсом на той же період становить ~ $5 \cdot 10^8$ грн. Відповідно, без урахування витрат на сепарацію і осушку, втрати

при вигоранні 90% становили б $\sim 4,5 \cdot 10^8$ грн,

при вигоранні 50% $\sim 2,5 \cdot 10^8$ грн,

при вигоранні 20% $\sim 1 \cdot 10^8$ грн.

Витрати на гасіння пожежі

При гасінні пожежі на обраній моделі повітряно-механічною піною прийнято, що для гасіння пожежі застосовувалася піна середньої кратності ($K=100$), яка (з урахуванням її стійкості) вкривала поверхню горіння шаром товщиною в 0,1 м, що повинно забезпечувати ізоляцію протягом 1,5–2,5 хв. Отже, для гасіння, коли вже вигоріло 90 % нафти на даній площі розливу потрібний об'єм піни складає $250000 \times 0,1 \times 0,1 = 2500 \text{ м}^3$. За звичай в таких випадках використовується 3%-й розчин піноутворювача. Отже, потрібна його кількість складає 75 т. На 01.06.2023 р. вартість піноутворювачів, які пропонуються на ринку, в середньому дорівнювала 18,0 грн/кг. Таким чином, без урахування витрат на доставку до місця пожежі і витрат на власне покриття поверхні, у випадку обраної моделі витрати на припинення горіння піною залишків (10 %) нафти при згасанні практично природним шляхом склали б: $75 \times 18 \cdot 10^3 = 1350 \cdot 10^3$ грн. (1,35 млн грн). Аналогічно, при гасінні з вигоранням 50 % нафти потрібна кількість складає 375 т (6,75 млн грн); а для забезпечення гасіння з вигоранням лише 10% потрібно 675 т піноутворювача на суму 12,15 млн грн.

Для розрахунку витрат вогнегасного засобу на основі пористого носія використано результати проведених раніше лабораторних випробувань і дані, отримані при підготовці пропозицій зі створення пілотної установки напівпромислового виробництва такого засобу [10]. Припинення горіння цим засобом досягається при витраті не більше 1,0 кг на 1 кв. м площі пожежі. Отже, для гасіння, коли вже вигоріло 90 % нафти, на дану площу розливу потрібна кількість такого засобу складає $250000 \times 0,1 \times 1 = 25$ тис. кг. При обчисленні собівартості виготовлення засобу на пілотної установці [10] знайдено, що вона дорівнює:

у випадку амонійфосфату 12,97 грн/кг;

у випадку діамонійфосфату 7,35 грн/кг, в середньому 10,0 грн/кг.

Таким чином, без урахування витрат на доставку до місця пожежі і витрат на власне покриття поверхні, у випадку обраної моделі витрати на припинення горіння даним засобом залишків (10%) нафти, коли вже вигоріло 90% її склали б: $25000 \times 10 \times 0,1 = 25$ тис. грн. Аналогічно, при гасінні з вигоранням 50 % нафти потрібна кількість складала б 125 тис. кг, а витрати 125 тис. грн; а для забезпечення гасіння з вигоранням лише 10% потрібно 225 тис. кг засобу на суму 225 тис. грн.

Шкода оточуючому середовищу. Кількість продуктів згорання при пожежі на обраній моделі

Як раніше [12] розраховано за відомою методикою [17], для повного спалювання 1 кг нафти обраного складу потрібно: $0,269[84,33/3+11,93+(3,5-0,04)/8] = 10,9 \text{ м}^3$ повітря.

Це означає, що коефіцієнт хімічного недопалу орієнтовно дорівнюватиме $K_{\text{хн}} = 0,90$ [17]. Тобто, 90% продуктів згорання нафти при пожежі буде знаходитися у газоподібному вигляді, а 10% завішені у цих газах у вигляді рідких та твердих частинок. Отже, при повному згоранні 20 тис. т такої нафти 18 тис. т з них перетворюються у газоподібні продукти згорання, а до 2 тис. т рідких та твердих частинок переходять у завис в димі та осідають на поверхню або змішуються з поверхневими шарами води.

Таблиця 1 – Орієнтовна кількість продуктів **повного** згорання 1 кг нафти

Елемент	Вміст у нафті, %	Склад продуктів горіння, м ³				
		CO ₂	CO	H ₂ O	SO ₂	N ₂
Карбон	84,33	0,9×0,84× 1,86	0,1×0,84× 1,86	-	-	0,9×0,84×7 + 0,1×0,84×3,5=5,59
Гідроген	11,93	-	-	0,12×11,2	-	0,12×21= 2,52
Сірка	3,5	-	-	-	0,03×0,7	0,03×2,63= 0,08
Нітроген	0,2	-	-	-	-	0,2×0,8= 0,16
Оксиген	0,04	-	-	-	-	-0,04×2,63= -0,11
Об'єм, м ³ / %		1,40 / 12,5	0,16 / 1,4	1,34 / 12,0	0,02 / 0,2	8,24 / 73,9
Об'єм, всього, м ³		11,16				
Маса, кг		1,4×44/ 22,4 = 2,75	0,16×28/ 22,4 = 0,20	1,34×18/ 22,4 = 1,08	0,02×64/ 22,4 = 0,06	8,24×28/22,4 = 10,30
Маса всього, кг		14,40				

При цьому було прийнято, що 90 % карбону згорає з утворенням вуглекислого газу і 10 % – з утворенням газу чадного. Враховуючи 10% недопалу, у першому наближенні можна вважати, що з 0,9 кг нафти, яка згоріла, утворюється наступна кількість газоподібних продуктів:

$2,75 \times 0,9 = 2,48$ кг CO₂; $0,2 \times 0,9 = 0,18$ кг CO; $1,08 \times 0,9 = 0,97$ кг парів води; $0,06 \times 0,9 = 0,05$ кг SO₂; $10,3 \times 0,9 = 9,27$ кг N₂; разом $11,16 \times 0,9 = 10$ м³, або $14,4 \times 0,9 = 13$ кг газоподібних продуктів.

Тобто, разом згорання 1 кг нафти такого складу дає (в перерахунку на нормальні умови) 10 м³ газоподібних продуктів, в яких у стані зависі знаходиться 0,1 кг твердих та рідких частинок.

При температурі пожежі (орієнтовно 1200 К) об'єм газоподібної фази буде у 4–5 разів більшим. При подальшому остиганні до температури оточуючого середовища цей об'єм поступово буде зменшуватися приблизно до тих же 10 м³ при наведеному у таблиці 1 відсотковому вмісті вологи, азоту і шкідливих речовин. Крім того, в хмарі продуктів горіння 1 кг нафти буде міститися 0,1 кг твердих та рідких залишків. Шкідливими з цієї хмари є карбон діоксид, карбон оксид, сульфур діоксид та рідкі і тверді частинки.

Для розрахунку продуктів горіння 20 тис. т нафти, якщо пожежа згасла природним шляхом, наведені цифри було помножено на $2 \cdot 10^7$.

Якщо пожежу вдалося загасити при вигоранні 90%, наведені цифри було помножено на $1,8 \cdot 10^7$;

при вигоранні 50% - на $1 \cdot 10^7$;

при вигоранні 20% - на $0,4 \cdot 10^7$.

В останніх випадках залишки незгорілої нафти було додано до тверди і рідких частинок, які потрапили у водне середовище. Отримані результати наведено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Кількість продуктів згорання нафти обраної моделі

При вигоранні, %	Кількість забруднювача, кг					
	CO ₂	CO	H ₂ O	SO ₂	N ₂	Тверді та рідкі залишки
100	$4,960 \cdot 10^7$	$0,360 \cdot 10^7$	$1,940 \cdot 10^7$	$0,100 \cdot 10^7$	$18,540 \cdot 10^7$	$0,2 \cdot 10^7$
90	$4,464 \cdot 10^7$	$0,324 \cdot 10^7$	$1,746 \cdot 10^7$	$0,090 \cdot 10^7$	$16,686 \cdot 10^7$	$(0,18-0,20) \cdot 10^7$
50	$2,480 \cdot 10^7$	$0,180 \cdot 10^7$	$0,970 \cdot 10^7$	$0,050 \cdot 10^7$	$9,270 \cdot 10^7$	$(0,10-1,00) \cdot 10^7$
20	$0,992 \cdot 10^7$	$0,072 \cdot 10^7$	$0,388 \cdot 10^7$	$0,020 \cdot 10^7$	$3,708 \cdot 10^7$	$(0,04-1,60) \cdot 10^7$

Штрафні санкції та завдання шкоди оточуючому середовищу

Для розрахунку шкоди повітряному простору, використано показники, наведені в інструкції «Про порядок обчислення та сплати збору за забруднення навколишнього середовища» [18, 19] (таблиця 3).

Таблиця 3 – Показники для розрахунку екологічних втрат від пожежі при горінні нафти обраного складу

За п/п	Показник	CO ₂	CO	SO ₂	Тверді та рідкі частинки
1	2	3	4	5	6
1	ГДК, мг/м ³	5000,0	20,0	10,0	20,0
2	A _i = 10 / ГДК	0,002	0,5	1,0	0,5
3	Клас небезпечності	4	4	3	4
4	K _T = 1,95	1,95	1,95	1,95	1,95
5	K _{zi} = 1	K _{zi} = 1	K _{zi} = 1	K _{zi} = 1	K _{zi} = 1
6	НЗ, грн/кг	0,019	0,019	0,019	0,019

Як і в попередніх роботах [4, 12] значення Коефіцієнта K_{zi} взято таким, що дорівнює 1, за припущенням, що вимір концентрації забруднюючих речовин в даному населеному пункті не проводився.

Таким чином, екологічні втрати (штрафні санкції) від викиду продуктів згорання в даному випадку становлять:

При згасанні полум'я за рахунок природного догорання:

$$A_{\phi} = (4,96 \times 0,019 \times 0,002 \times 1,95 \times 1 + 0,36 \times 0,019 \times 0,5 \times 1,95 \times 1 + 0,1 \times 0,019 \times 1,0 \times 1,95 \times 1 + 0,2 \times 0,019 \times 0,5 \times 1,95 \times 1) \cdot 10^7 = (0,0003673 + 0,006669 + 0,003705 + 0,003705) \cdot 10^7 = 0,0144673 \cdot 10^7 = 144,673 \cdot 10^3 = 144,7 \text{ тис. грн.}$$

При вигоранні 90 % нафти:

$$A_{\phi} = (4,464 \times 0,019 \times 0,002 \times 1,95 \times 1 + 0,324 \times 0,019 \times 0,5 \times 1,95 \times 1 + 0,09 \times 0,019 \times 1,0 \times 1,95 \times 1 + 0,38 \times 0,019 \times 0,5 \times 1,95 \times 1) \cdot 10^7 = (0,0003307 + 0,006002 + 0,0033345 + 0,0070395) \cdot 10^7 = 0,0167247 \cdot 10^7 = 167,247 \cdot 10^3 = 167,2 \text{ тис. грн.}$$

При вигоранні 50 % нафти:

$$A_{\phi} = (2,48 \times 0,019 \times 0,002 \times 1,95 \times 1 + 0,18 \times 0,019 \times 0,5 \times 1,95 \times 1 + 0,05 \times 0,019 \times 1,0 \times 1,95 \times 1 + 1,1 \times 0,019 \times 0,5 \times 1,95 \times 1) \cdot 10^7 = (0,0001836 + 0,003345 + 0,0018525 + 0,0203775) \cdot 10^7 = 0,0257586 \cdot 10^7 = 257,586 \cdot 10^3 = 257,6 \text{ тис. грн.}$$

При вигоранні 10 % нафти:

$$A_{\phi} = (0,992 \times 0,019 \times 0,002 \times 1,95 \times 1 + 0,072 \times 0,019 \times 0,5 \times 1,95 \times 1 + 0,02 \times 0,019 \times 1,0 \times 1,95 \times 1 + 1,64 \times 0,019 \times 0,5 \times 1,95 \times 1) \cdot 10^7 = (0,0000733 + 0,0013338 + 0,000741 + 0,030381) \cdot 10^7 = 0,0325291 \cdot 10^7 = 325,291 \cdot 10^3 = 325,3 \text{ тис. грн.}$$

Для спрощення, шкоду від потрапляння у воду піноутворювача в даному випадку прийнято такою ж, як і шкода від твердих та рідких залишків догорання, тобто при відсутності гасіння A_ф = 0,

при гасіння залишків у 10%:

$$A_{\phi} = (7,5 \times 0,019 \times 0,5 \times 1,95 \times 1) \cdot 10^7 = 0,01389375 \cdot 10^7 = 138,9375 \cdot 10^3 = 138,9 \text{ тис. грн.}$$

при гасіння залишків у 50%:

$$A_{\phi} = (37,5 \times 0,019 \times 0,5 \times 1,95 \times 1) \cdot 10^7 = 0,06946875 \cdot 10^7 = 694,6875 \cdot 10^3 = 694,7 \text{ тис. грн.}$$

при гасінні із збереженням від вигорання 90% продукту:

$$A_{\phi} = (67,5 \times 0,019 \times 0,5 \times 1,95 \times 1) \cdot 10^7 = 0,12504375 \cdot 10^7 = 1250,4375 \cdot 10^3 = 1250,4 \text{ тис. грн.}$$

Обговорення результатів дослідження. З попереднього розділу впливає на перший погляд парадоксальний результат: чим більше нафти вигоріло, тим меншими є штрафні санкції за забруднення оточуючого середовища. Пояснення криється в тому, що шкода (і штрафні санкції) від потрапляння у воду самої нафти перевищують шкоду від продуктів її згорання. Тим не менше, гасити таку пожежу необхідно, адже без припинення горіння неможливо проводити ніякі операції зі збору і сепарації розлитої нафти. При врахуванні матеріальних втрат (втрат самої нафти) стає очевидним, що гасити пожежу значно вигідніше, ніж втратити весь вантаж. Отримані результати дослідження наведені у таблиці 4.

Як впливає з таблиці 4, застосування для гасіння пожежі обраної моделі засобів на основі високопористого носія, порівняно з повітряно-механічною піною, дає змогу зменшити суму втрат і витрат при вигоранні :

90 % нафти	на 2,4639 млн грн;
50 % нафти	на 5,3197 млн грн.;
10 % нафти	на 13,1754 млн грн..

Таблиця 4 – Сума втрат від умовної пожежі і витрат на її гасіння, тис. грн

При умові гасіння пожежі	При вигоранні кількості нафти, %			
	100	90	50	10
1	2	3	4	5
Догорання без гасіння	500000,0+144,7=500144,7	450000,0+167,2=450167,2	250000,0+257,6=250257,6	100000,0+325,3=100325,3
Гасіння повітряно-механічною піною	500000,0+144,7=500144,7	450000,0+167,2+138,9+1350,0=452656,1	250000,0+257,6+694,7+6750,0=257702,3	100000,0+325,3+1250,4+12150,0=113725,7
Гасіння засобом на основі високопористого носія	500000,0+144,7=500144,7	450000,0+167,2+25,0=450192,2	250000,0+257,6+125,0=250382,6	100000,0+325,3+225,0=100550,3

Висновки

1. На моделі горіння 20 тис. тон нафти найбільш поширеного складу, розлитої на поверхні водойми, розраховано суму матеріальних втрат, втрат від шкоди оточуючому середовищу і витрат на гасіння такої пожежі повітряно-механічною піною і засобом на основі високопористого носія.

2. Знайдено, що гасіння такої пожежі на будь-якій стадії економічно вигідніше, ніж пасивне очікування вигорання нафти, в-основному завдяки забезпеченню можливості наступного збору і сепарації цінного продукту.

3. Показано, що застосування для гасіння обраної моделі пожежі засобом на основі високопористого носія вигідніше, ніж гасіння її повітряно-механічною піною. При цьому, чим більшої витрати засобу вимагатиме гасіння пожежі, тим більшим буде економічний ефект від застосування засобу на основі високопористого носія.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Екологічні наслідки пожеж на поверхні водойм та способи зниження їх негативного впливу / А. Алексєєв та ін. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*» Збірник наукових праць Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України. 2019. Т. 3, № 2. С. 5–14.
2. Fate of marine oil spills. *IOPF*. (2011) URL: https://www.itopf.org/fileadmin/uploads/itopf/data/Documents/TIPS_TAPS_new/TIP_2_Fate_of_Marine_Oil_Spills.pdf (date of access: 01.02.2024).
3. Environmental damage: Changing perceptions and future outlook. (2018) *IOPF*. URL: https://www.itopf.org/fileadmin/uploads/itopf/data/Documents/TIPS_TAPS_new/TIP_2_Fate_of_Marine_Oil_Spills.pdf (date of access: 01.02.2024).
4. Оцінка кількості шкідливих речовин в продуктах згорання при пожежі розлитих горючих рідин / М. Куценко та ін. *Матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»* : Матеріали Міжнар. науково-практ. конф., м. Черкаси, 9-10 квіт. 2020 р. Черкаси, 2020. С. 170–173.
5. An unexpected and persistent increase in global emissions of ozone-depleting CFC-11 / Stephen A. Montzka et al. *Nature*. 2018. Vol. 557, pp. 413–417.
6. Спосіб виробництва вогнегасного засобу : пат. 91399 Україна. Опубл. 10.07.2014.
7. Вогнегасний засіб : пат. 91400 Україна. Опубл. 10.07.2014.
8. Вогнегасний засіб: пат. 136531 Україна. Опубл. 27.08.2019.
9. Спосіб виготовлення вогнегасного засобу : пат. 136533 Україна. Опубл. 27.08.2019.
10. Техніко-економічне обґрунтування організації виготовлення засобів для гасіння пожеж горючих рідин на основі вогнегасних солей, іммобілізованих пористим носієм. / М. Куценко та ін. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*» Збірник наукових праць Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України. 2019. Т. 3, № 1. С. 42–50.
11. До проблеми гасіння пожеж при горінні розлитих горючих рідин / Г. Єлагін та ін. *Матеріали X Української науково-практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: Безпека та захист»* : Матеріали Української. науково-практ. конф., м. Черкаси, 29-30 жовт. 2020 р. Черкаси, 2020. С. 142–144.
12. Оцінка кількості шкідливих речовин в продуктах згорання при пожежі розлитих горючих рідин та екологічних втрат внаслідок такої пожежі / М. Куценко та ін. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*» Збірник наукових праць Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України. 2020. Т. 4, № 1. С. 39–47.
13. Вогнегасний засіб : пат. 144950 Україна. Опубл. 10.11.2020.
14. Спосіб виробництва генератора вогнегасного аерозолю : пат. 147260 Україна. Опубл. 21.04.2021.
15. Extinguishing media for spilled flammable liquids / G. Jelagin et al. *The scientific heritage*. 2022. Vol. 84(84), pp. 15–25.
16. D A. M. H. P. What Is Petroleum Made Of? Chemical Composition. *ThoughtCo*. URL: <https://www.thoughtco.com/chemical-composition-of-petroleum-607575> (date of access: 01.02.2024).
17. Виникнення і розвиток горіння та вибуху. Припинення горіння / Г. Єлагін та ін. Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля, 2020. 443 с.

18. Про затвердження Методики оцінки збитків від наслідків надзвичайних ситуацій техногенного і природного характеру : Постанова Каб. Міністрів України від 15.02.2002 р. № 175 : станом на 4 черв. 2003 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/175-2002-п#Text> (дата звернення: 01.02.2024).

19. Методика наближеного розрахунку екологічних втрат від забруднення навколишнього природного середовища внаслідок пожежі / М. Шкарабура та ін. *Науковий збірник «Проблеми пожежної безпеки»*: вип. 14, Харків «Фоліо», 2003. С. 91–93.

REFERENCES

1. Ekolohichni naslidky pozhezh na poverkhni vodoim ta sposoby znyzhennia yikh nehatyvnoho vplyvu // Ecological consequences of fires on the surface of water bodies and ways to reduce their negative impact / A. Alekseyev et al. / "Emergencies: Prevention and Elimination." Collection of scientific works of the Cherkasy Institute of Fire Safety named after the Heroes of Chernobyl of the National University of Civil Defense of Ukraine, 2019, v. 3, № 2, pp. 5-14 (in Ukrainian).

2. Fate of marine oil spills. *ILOPF*. (2011) URL: https://www.itopf.org/fileadmin/uploads/itopf/data/Documents/TIPS_TAPS_new/TIP_2_Fate_of_Marine_Oil_Spills.pdf (date of access: 01.02.2024).

3. Environmental damage: Changing perceptions and future outlook. (2018) *ILOPF*. URL: https://www.itopf.org/fileadmin/uploads/itopf/data/Documents/TIPS_TAPS_new/TIP_2_Fate_of_Marine_Oil_Spills.pdf (date of access: 01.02.2024).

4. Otsinka kilkosti shkidlyvykh rehovyn v produktakh zghorannia pry pozhezhi rozlytykh horiuchykh ridyn // Estimation of the amount of harmful substances in combustion products during a fire of spilled flammable liquids / M. Kutsenko et al. *Materials of the 11th International Scientific and Practical Conference "Theory and Practice of Fire Extinguishing and Eliminating Emergency Situations"* Cherkasy, Ukraine, pp. 170-173 (in Ukrainian).

5. An unexpected and persistent increase in global emissions of ozone-depleting CFC-11 / Stephen A. Montzka et al. *Nature*. 2018. Vol. 557, pp. 413–417.

6. The method of production of fire extinguishing agent. Pat. 91399 Ukraine. Publ. 10.07.2014.

7. Fire extinguisher. Pat. 91400 Ukraine. Publ. 10.07.2014.

8. Fire extinguisher. Pat. 136531 Ukraine. Publ. 27.08.2019.

9. The method of production of fire extinguishing agent. Pat. 136533 Ukraine. Publ. 27.08.2019.

10. Tekhniko-ekonomichne obruntuvannia orhanizatsii vyhotovlennia zasobiv dlia hasinnia pozhezh horiuchykh ridyn na osnovi vohnehasnykh solei, immobilizovanykh porystym nosiiem. / Feasibility study for the organization of the manufacture of fire extinguishing agents for combustible liquids based on fire-extinguishing salts immobilized with a porous carrier. M. Kutsenko et al. "Emergencies: Prevention and Elimination." Collection of scientific works of the Cherkasy Institute of Fire Safety named after the Heroes of Chernobyl of the National University of Civil Defense of Ukraine, 2019, v. 3, № 1, p. 42-50. (in Ukrainian).

11. Do problemy hasinnia pozhezh pry horinni rozlytykh horiuchykh ridyn // To the problem of extinguishing fires during the burning of spilled flammable liquids G. Yelagin et al. *Materials of the 10th Ukrainian scientific and practical conference with international participation "Emergency situations: Security and protection"*. October 29-30, 2020, pp. 142-144 (in Ukrainian).

12. Otsinka kilkosti shkidlyvykh rehovyn v produktakh zghorannia pry pozhezhi rozlytykh horiuchykh ridyn ta ekolohichnykh vtrat vnaslidok takoi pozhezhi // Assessment of

the amount of harmful substances in combustion products during a fire of spilled flammable liquids and environmental losses due to such a fire. M. Kutsenko et al. "Emergencies: Prevention and Elimination." Collection of scientific works of the Cherkasy Institute of Fire Safety named after the Heroes of Chernobyl of the National University of Civil Defense of Ukraine, 2020, vol. 4, no 1, pp. 39-47 (in Ukrainian).

13. Fire extinguisher. Pat. 144950 Ukraine. Publ. 10.11.2020.

14. The method of production of a fire-extinguishing aerosol generator. Pat. 147260 Ukraine. Publ. 04/21/2021.

15. Extinguishing media for spilled flammable liquids / G. Jelagin et al. *The scientific heritage*. 2022. Vol. 84(84), pp. 15–25.

16. D A. M. H. P. What Is Petroleum Made Of? Chemical Composition. *ThoughtCo*. URL: <https://www.thoughtco.com/chemical-composition-of-petroleum-607575> (date of access: 01.02.2024).

17. Vynyknennia i rozvytok horinnia ta vybukhu. Prypynennia horinnia // Occurrence and development of burning and explosion. Burnout of burning / G. Yelagin et al. Cherkasy: Cherkasy Institute of Fire Safety named after the Heroes of Chernobyl. 2020. 443 p. (in Ukrainian).

18. Pro zatverdzhennia Metodyky otsinky zbytkiv vid naslidkiv nadzvychnykh sytuatsii tekhnohennoho i pryrodnoho kharakteru // On approval of the Methodology for assessing damages from the consequences of man-made and natural emergencies: Decree of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated February 15, 2002 No. 175: URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/175-2002-п#Text> (date of access: 01.02.2024).

19. Metodyka nablyzhenoho rozrakhunku ekolohichnykh vtrat vid zabrudnennia navkolyshnoho pryrodnoho seredovyscha vnaslidok pozhezhi // The technique of the approached environmental impact on the development of the natural environment in the future / M.Shkarabura et al. Scientific collection «*Problems of fire safety*» Kharkiv: «Folio», 2003, vol. 14, pp. 91-93. (in Ukrainian).

*Maria KUTSENKO, Ph.D. (ORCID 0000-0001-6879-9187),
George YELAGIN, Ph.D. (ORCID 0000-0003-2577-6430),
Anatoly ALEKSEEV, Ph.D. (ORCID 0000-0003-4114-5807),
Olena ALEKSEEVA, Ph.D. (ORCID 0000-0003-0119-4081),
Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chornobyl Heroes
of National University of Civil Protection of Ukraine*

ECONOMIC ASPECTS OF FIRE EXTINGUISHING OF FLAMMABLE LIQUIDS SPILLED ON THE SURFACE OF WATER

The analysis of potential losses from fires of flammable liquids spilled on the surface of the reservoir and the costs of extinguishing such fires was carried out. Considered material losses, losses from damage to the environment and costs for extinguishing the fire. At the same time, the cases of complete burnout of the combustible liquid, extinguishing the fire with air-mechanical foam and extinguishing it with fire extinguishing agents, which are a porous medium with fire-extinguishing salts adsorbed in the pores, were considered. The introductory part highlights the problem of extinguishing such fires and the purpose of the analysis. When presenting the main material, the proposed fire model is described, which represents the burning of 20,000 tons of oil on the surface of the reservoir; and seven cases of cessation of combustion. Namely: complete burnout of spilled oil; cessation of combustion with air-mechanical foam after burning of 90%, 50% and 20% of oil; cessation of combustion after burning out the same 90%, 50% and 20% oil by means that are a porous medium with

fire-extinguishing salts adsorbed in the pores. It was found that with passive expectation of complete burnout of such amount of oil, the amount of material and environmental losses will amount to UAH 500.1447 million. When extinguishing a fire with air-mechanical foam, the amount of losses and costs will be: when 90% of oil is burned - UAH 452.6561 million, when 50% of oil is burned - UAH 257.7023 million, when 10% of oil is burned - UAH 113.7257 million. UAH Extinguishing with the use of means based on a porous medium with fire-extinguishing salts adsorbed in the pores will allow to reduce the amount of losses and expenses to: in case of burnout of 90% of oil - UAH 450.1922 million, in case of burnout of 50% of oil - UAH 250.3826 million, in case of burnout 10% of oil - UAH 100.550357 million.

Key words: *technical and economic analysis, liquid combustion, reservoir surface, material losses, ecological losses, extinguishing costs, inhibition, carriers, fire-extinguishing salts, immobilization.*