

УДК 614.84

О. В. Кулаков, к.т.н., доцент, н.с. відділу (ORCID 0000-0001-5236-1949)

А. М. Катунін, к.т.н., с.н.с., викл. каф. (ORCID 0000-0003-2171-4558)

Ю. В. Михайловська, PhD, с.н.с. відділу (ORCID 0000-0003-1090-5033)

Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ ЗОН РЕЗЕРВУАРІВ ЗІ СВІТЛИМИ НАФТОПРОДУКТАМИ

Досліджено класи та розміри вибухонебезпечних зон резервуарів зі світлими нафтопродуктами залежно від умов їх зберігання: всередині резервуару, навколо дихального клапану, що не виключає виток небезпечних парів з резервуару у атмосферу та при аварійній некатастрофічній розгерметизації резервуару. Розрахунки здійснювалися трьома методами: розрахунковим методом визначення гіпотетичного об'єму, розрахунковим методом з використанням номограм та детермінованим методом. Розрахунки, виконані детермінованим методом, не відповідають результатам, отриманим з використанням розрахункових методів. Розрахунки, проведені методом визначення гіпотетичного об'єму, дають більш високі розміри вибухонебезпечних зон у порівнянні з отриманими методом з використанням номограм. Класи та розміри зон за детермінованим методом є фіксованими та незалежними від умов навколишнього середовища. Всередині резервуару має місце вибухонебезпечна зона класу 0. Навколо дихального клапану резервуару залежно від швидкості руху парів через отвір клапану при різних швидкостях вітру за нормальних умов за розрахунковими методами час існування вибухонебезпечної зони є максимальним за відсутності примусового розсіювання вибухонебезпечної суміші. При збільшенні швидкості руху парів через отвір дихального клапану збільшення радіусу вибухонебезпечної зони відбувається за логарифмічним законом. Зміна температури призводить до незначної зміни радіусу. При розгерметизації резервуару збільшення радіусу вибухонебезпечної зони при збільшенні швидкості витоку відбувається також за логарифмічним законом. Радіус зони, отриманий методом визначення гіпотетичного об'єму майже у два рази перевищує радіус, розрахований методом з використанням номограм. Максимально можливий радіус становить 20 м та 9 м, відповідно, при швидкості витоку бензину 10 кг/с. Детермінованим методом радіус зафіксований на рівні 3 м для усіх умов витоку.

Ключові слова: вибухонебезпечна зона, резервуар, світлі нафтопродукти, швидкість вітру, швидкість витоку

1. Вступ

Вибухонебезпечні зони (ВНЗ) характеризуються обертанням значної кількості вибухонебезпечних речовин (горючих газів, легкозаймистих рідин (ЛЗР) та вибухонебезпечної пилу), та уявляють підвищену вибухо- та пожежну небезпеку [1]. Для кожної ВНЗ встановлюється клас, за яким визначаються правила улаштування технологічного та електротехнічного обладнання. Внаслідок обертання вибухонебезпечних речовин (як правило у значній кількості), наслідки вибухів та пожеж на об'єктах з ВНЗ є надзвичайно резонансними.

Забезпечення вибухо- та пожежної безпеки об'єктів, зокрема з вибухонебезпечними зонами, є питанням державної безпеки. Тому, ця проблема є актуальною.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Одним із напрямків попередження вибухів та пожеж є запобігання появи джерел запалювання в горючому середовищі. Правильне встановлення класу і розміру ВНЗ, з одного боку, попередить вибух та пожежу від джерел запалювання електричного походження, а з іншого боку, зменшить вартість улаштування електро- та технологічного обладнання.

В Європейському Союзі питаннями встановленням класів та розмірів ВНЗ займається Міжнародна електротехнічна комісія (International Electrotechnical Commission (IEC)) [2], в Сполучених Штатах Америки – Національна протипожежна асоціація (National Fire Protection Association (NFPA)) [3], у Великій Британії – Британський інститут стандартів (British Standards Institution (BSI)) [4].

У 1972 році ІЕС вперше був опублікований стандарт ІЕС 79-10 щодо класифікації ВНЗ, що створюються газопароповітряними сумішами. У 2008 році вийшла редакція Ed.1.0 ІЕС 60079-10-1 (EN 60079-10-1). Згідно цієї редакції клас і розмір ВНЗ розраховувалися методом визначення гіпотетичного об'єму. Клас і розмір ВНЗ залежать від ступеня витоку небезпечної речовини та рівня вентиляції. Клас ВНЗ визначається величиною гіпотетичного об'єму вибухонебезпечної суміші (V_z) у співвідношенні до загального об'єму V_0 , що вентилюється. При розрахунках для зовнішніх установок (ЗУ) V_0 вважається фіксованим та рівним $V_0 = 3400 \text{ м}^3$). Якщо розрахований гіпотетичний об'єм V_z є незначним (меншим $0,1 \text{ м}^3$), то рівень вентиляції є високим; якщо V_z менший або дорівнює V_0 – середній; якщо V_z перевищує V_0 – низький. При низькому рівні вентиляції має місце ВНЗ класу 1, при середньому – 2, при значному – ВНЗ відсутня. Розмір ВНЗ визначається з величини гіпотетичного об'єму V_z . Для ЗУ за відсутності вітру ВНЗ має форму шару з відповідним радіусом. Досвід використання Ed.1.0 ІЕС 60079-10-1 (EN 60079-10-1) показав недосконалість застосованого методу розрахунку. Тому у вересні 2008 року ІЕС було прийнято редакцію Ed.2.0 ІЕС 60079-10-1 (EN 60079-10-1) [5], а у листопаді того ж року здійснено її корегування, після чого встановлення класів і розмірів ВНЗ здійснювалося методом з використанням номограм. Подальше удосконалення ІЕС 60079-10-1 (EN 60079-10-1) (редакція Ed.3.0) проведене у грудні 2020 року.

NFPA класифікація газопароповітряних ВНЗ здійснюється згідно [6] з рекомендаціями [7, 8], BSI – [5] з рекомендаціями [9].

В Україні з 2001 року діють правила НПАОП 40.1-1.32 з детермінованим методом встановлення класів та розмірів ВНЗ. З вересня 2018 року методом обкладинки паралельно прийнятий національний ДСТУ EN 60079-10-1, який є ідентичним редакції Ed. 2.0 [5].

Аналізу особливостей встановлення класів і розмірів ВНЗ присвячено ряд робіт у наукових виданнях.

В роботі [1] встановлено особливості визначення класів і розмірів газопароповітряних ВНЗ, що створюються навколо ЗУ, на прикладі негерметичної муфти надземного газопроводу природного газу. Дослідження здійснювалися з використанням методу розрахунку величини гіпотетичного об'єму V_z та детермінованого методу. Недоліком роботи можна вважати не застосування більш сучасного методу з використанням номограм та обмеження аналізу V_z горючого газу метану з повітрям.

Робота [10] фактично є посібником по застосуванню методу з використанням номограм зі стандарту редакції Ed.2.0 ІЕС 60079-10-1 (EN 60079-10-1). Здійснюється порівняння цього методу з вимогами документів [7–9]. Недоліком роботи слід вважати те, що дослідження здійснювалися для типових прикладів, взятих з тексту Ed.2.0 ІЕС 60079-10-1 (EN 60079-10-1), а саме: насос для перекачування бензолу з механічною діафрагмою, запобіжний клапан резервуару з бензолом, трубопровід для перекачування ЛЗР, компресорна станція для перекачування природного газу тощо при різних аварійних ситуаціях.

В роботі [11] запропоновано альтернативний метод для визначення класів і розмірів ВНЗ, побудований на CFD (Computational Fluid Dynamics)-моделі. В роботі представлена адаптація моделей для визначення очікуваного об'єму газової хмари, що виникає в результаті викиду газу з джерела під тиском. Міжнародна електротехнічна комісія не заперечує застосування нестандартних методів розрахунку, але приведений альтернативний метод не порівнюється з рекомендованим та відрізняється складністю застосування.

Метою роботи [12] є огляд методів визначення розмірів ВНЗ на промислових об'єктах, де можуть бути присутніми горючі гази або пари ЛЗР. Аналізуються і порівнюються три різні підходи. Перший рекомендований в північноамериканських стандартах, таких як API 500, API 505 і NFPA 497. Другий є проектом Ed.2.0 IEC 60079-10-1 (EN 60079-10-1). Третій був розроблений раніше за участю авторів і прийнятий італійським керівництвом в національному стандарті CEI 31-35. Останні два підходи є аналітичними, а перший є приписуючим. У другій частині цієї статті обидва аналітичні підходи застосовуються до викидів, які аналізуються в NFPA 497 в якості практичних прикладів. Перевагою роботи є те, що автори намагаються запропонувати свій метод встановлення класів та розмірів ВНЗ та показують його переваги, але не вказують його недоліки.

В роботі [13] проведено порівняння між різними моделями розсіювання газу, покликани допомогти фахівцям в проведенні надійних досліджень по класифікації ВНЗ. При проектуванні електроустановок в промисловості, що переробляє ЛЗР, необхідно знати, де знаходяться небезпечні місця, що підлягають класифікації. Ці місця позначені на кресленнях для вказівки специфікації відповідного електричного і електронного устаткування. Перевагою роботи є те, що автори показують, що практика копіювання і вставки розрахунків з нормативних документів без проведення власних розрахунків класів та розмірів ВНЗ не гарантує правильної установки обладнання. Недоліком є відсутність конкретних прикладів розрахунків.

В роботі [14] опубліковано результати натурального експерименту по витoku важкого горючого газу у приміщенні. Для моделювання процесу розсіювання з урахуванням інтенсивності вентиляції використовувався метод CFD. В роботі [15] приведено результати дослідження умов та розмірів ВНЗ, створених аміаком. Доведено, що використання системи водяної завіси для примусового пом'якшення хмари парів аміаку є ефективною мірою. Запропоновано технічне керівництво по проектуванню ефективної системи водяної завіси з урахуванням запропонованого розуміння складних взаємодій між хмарою аміаку й краплями води з використанням CFD програмного забезпечення. У роботах [14, 15], як й у роботі [11] використовується складна для застосування та недостатньо доказана практикою застосування CFD-модель.

Важливою та недостатньо дослідженою частиною проблеми, що розглядається, слід вважати дослідження класів і розмірів ВНЗ резервуарів зі світлими нафтопродуктами залежно від умов зовнішнього середовища та витoku, з використанням сучасних методів розрахунку.

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є дослідження параметрів вибухонебезпечних зон резервуарів зі світлими нафтопродуктами.

Для досягнення мети роботи поставлені наступні завдання:

- провести аналіз національних методів визначення параметрів вибухоне-

безпечних зон резервуарів зі світлими нафтопродуктами;

– дослідити параметри вибухонебезпечних зон резервуарів зі світлими нафтопродуктами залежно від можливих режимів роботи та умов зберігання нафтопродуктів.

4. Аналіз національних методів визначення параметрів вибухонебезпечних зон резервуарів

Параметрами, що характеризують ВНЗ, є клас ВНЗ та розмір ВНЗ.

Резервуари зі світлими нафтопродуктами слід віднести до ЗУ, в яких обертаються ЛЗР або їх пари. ЗУ – установка, розміщена поза приміщенням (зовні) просто неба або під дахом чи за сітчастими захисними конструкціями.

Класи та розміри ВНЗ можуть встановлюватися розрахунковим методом визначення гіпотетичного об'єму (метод Ed.1.0 ІЕС 60079-10-1 (EN 60079-10-1)), розрахунковим методом з використанням номограм (метод Ed.2.0 ІЕС 60079-10-1 (EN 60079-10-1)) та детермінованим методом (метод НПАОП 40.1-1.32).

В роботі [1] докладно досліджено вимоги та порядок застосування розрахункового методу визначення гіпотетичного об'єму та детермінованого методу. Відповідно до національного законодавства на сьогодні обов'язковим є детермінований метод. Розрахунковим методом з використанням номограм пароповіряні ВС можуть утворювати навколо ЗУ ВНЗ трьох класів: 0 (простір, у якому ВС присутнє постійно або протягом тривалого часу або часто), 1 (простір, у якому існує можливість створення ВС під час нормальної роботи), 2 (простір, у якому ВС за нормальних умов експлуатації відсутнє, а якщо воно виникає, то рідко і триває недовго). Для встановлення класів і розмірів ВНЗ використовуються номограми. Вихідними параметрами є кліматичні умови та властивості небезпечних речовин.

Визначається ступінь витoku небезпечної речовини (безперервний, першого або другого ступеня). Залежно від ступеня витoku вводиться коефіцієнт безпеки k по відношенню до нижньої концентраційної межі поширення полум'я (НКМПП).

При безперервному витoku небезпечної речовини (виток, що існує постійно, наприклад, поверхня над рівнем рідини в резервуарі з постійно відкритим в атмосферу вентиляційним клапаном) створюється, як правило, ВНЗ класу 0. При витoku першого ступеня небезпечної речовини (виток, що є випадковим при нормальному режимі роботи, наприклад, об'єм над вентиляційним клапаном резервуару, через який можливий виток в атмосферу небезпечної речовини при нормальному режимі роботи; вентиляція відсутня) створюється ВНЗ класу 1. При витoku другого ступеня небезпечної речовини (виток, не можливий при нормальних режимах роботи, наприклад, об'єм над вентиляційним клапаном резервуару, через який відсутній виток в атмосферу небезпечної речовини при нормальному режимі роботи; вентиляція відсутня) створюється ВНЗ класу 2.

Можлива швидкість витoku W ЛЗР встановлюється за формулою:

$$W = C_d \cdot S \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot \Delta p}, \text{ кг/с}, \quad (1)$$

де $C_d \leq 1$ – коефіцієнт витoku; S – площа поперечного перерізу отвору, через який відбувається виток, м^2 ; ρ – густина ЛЗР, кг/м^3 ; Δp – різниця тиску в отворі, з якого здійснюється виток, Па.

Враховуючі, що ЛЗР в резервуарах зберігається під незначним тиском, обумовленим відповідними клапанами, масова швидкість витоку W_g пари буде дограничною (меншою від швидкості звуку для неї) й встановлюється за формулою:

$$W_g = C_d \cdot S \cdot P \cdot \sqrt{\frac{M}{Z \cdot R \cdot T} \cdot \frac{2 \cdot \gamma}{\gamma - 1} \cdot \left[1 - \left(\frac{P_0}{P}\right)^\gamma\right] \cdot \left(\frac{P_0}{P}\right)^{\frac{1}{\gamma}}}, \text{ кг/с}, \quad (2)$$

де P – тиск всередині резервуару, Па; P_0 – тиск зовні резервуару (атмосферний), Па; M – молярна маса пари, кг/кмоль; Z – коефіцієнт стиснення (безрозмірний); $R = 8,3 \cdot 10^3$ Дж/(кмоль · К) – універсальна газова константа; T – абсолютна температура всередині резервуару, К; $\gamma = \frac{M \cdot C_p}{M \cdot C_p - R}$ – відношення питомих теплоемностей (показник політропи адіабатичного розширення); C_p – питома теплоємність при постійному тиску, Дж/(кг · К).

Розраховується коефіцієнт витоку $\frac{W_g}{\rho_g \cdot k \cdot C_{\text{НКМПП}}}$, м³/с, де ρ_g , кг/м³ – щільність газу (пару); $C_{\text{НКМПП}}$, об./об. – НКМПП; k – безрозмірний коефіцієнт безпеки, залежний від НКМПП (знаходиться в межах від 0,5 до 1,0; чим менше k – тим не безпечнішою є речовина).

За номограмою рис. С.1 Ed.2.0 ІЕС 60079-10-1 (EN 60079-10-1) залежно від величини коефіцієнту витоку та швидкості вентиляції (вітру) u_w , м/с встановлюється ступінь вентиляції (висока, середня або низька). За умов, якщо ступінь вентиляції є низькою за умов постійного витоку має місце ВНЗ класу 1, якщо ступінь вентиляції є середньою – має місце ВНЗ класу 2, якщо ступінь вентиляції є високою – ВНЗ відсутня. Таким чином, регулюючи швидкість вентиляції можливо змінювати клас ВНЗ. За номограмою рис. D.1 Ed.2.0 ІЕС 60079-10-1 (EN 60079-10-1), залежно від величини коефіцієнту витоку та властивостей джерела витоку (важкий газ або пара, дифузний газ або пара або газовий (паровий) струмінь), визначається розмір ВНЗ.

Згідно додатку А.2 Ed.2.0 ІЕС 60079-10-1 (EN 60079-10-1) залежно від властивостей джерела витоку встановлюється форма ВНЗ, що необхідно, зокрема, для правильного улаштування блискавкозахисту резервуарів згідно вимог [16–19], що прийняті у 2012 році як національні стандарти серії ДСТУ EN 62305.

5. Дослідження параметрів вибухонебезпечних зон резервуарів зі світлими нафтопродуктами

Світлі нафтопродукти (бензин, дизельне паливо, керосин тощо) є, як правило, ЛЗР. Тому простори всередині та навколо резервуарів зі світлими нафтопродуктами слід віднести до пароповітряних ВНЗ.

Для встановлення класів і розмірів ВНЗ резервуарів зі світлими нафтопродуктами застосовуємо наступні методи: розрахунковий метод визначення гіпотетичного об'єму, розрахунковий метод з використанням номограм та детермінований метод. При проведенні розрахунків, враховуючі величину НКМПП бензину, вва-

жаємо коефіцієнт безпеки мінімальним ($k = 1,0$).

Всередині резервуару має місце ВНЗ класу 0 – простір, у якому ВС присутнє постійно або протягом тривалого часу або часто. Наприклад, для бензину марки А-92 ВС всередині резервуару присутнє постійно при концентраційних межах поширення полум'я від нижньої $C_H^0 = 1,06$ % об. до верхньої $C_B^0 = 5,5$ % об. [20]. В інших випадках ВС середовище відсутнє. Таким чином, слід вважати, що всередині резервуару, дійсно, має місце ВНЗ класу 0.

За нормальних умов експлуатації резервуара ВС зовні утворюється, зокрема, при спрацьовуванні дихальних та запобіжних клапанів.

Встановимо клас та розмір ВНЗ зовні резервуару з бензином марки А-92 при спрацьовуванні дихального клапану, що не виключає виток небезпечних парів з резервуару у атмосферу (використовуємо паспортні дані стандартного сполучного механічного дихального клапану СМДК-50, що широко застосовується на резервуарах нафтобаз та автозаправних станцій). Припускаємо, що клапан повністю відкритий (відбувається заповнення резервуару нафтопродуктом з високою швидкістю). У цьому випадку тип витoku є первинним – тому має місце ВНЗ класу 1 (простір, у якому існує можливість створення ВС під час нормальної роботи).

Умови створення та існування ВНЗ залежать від рівня вентиляції ВС. Найгіршим є випадок відсутності примусового розсіювання ВС (тобто відсутність вітру). В табл. 1 приведено результати визначення рівня вентиляції в залежності від швидкості руху парів W_g через отвір клапану діаметром $D=50$ мм при різних швидкостях вітру u_w за нормальних умов (температура 20°C , атмосферний тиск 101 кПа), отримані з використанням номограми рис. С.1 Ed.2.0 ІЕС 60079-10-1 1 (EN 60079-10-1).

Табл. 1. Залежність рівня вентиляції від швидкості руху парів W_g через отвір клапану діаметром $D=50$ мм при різних швидкостях вітру u_w за нормальних умов

Рівень вентиляції	Високий	Середній	Низький
$W_g=25$ м3/год			
u_w , м/с	>9,0	Від 0,03 до 9,0	<0,03
$W_g=15$ м3/год			
u_w , м/с	>5,0	Від 0,02 до 5,0	<0,02
$W_g=5$ м3/год			
u_w , м/с	>2,0	Від 0,007 до 2,0	<0,007

Встановимо залежність радіусу d ВНЗ класу 1 від швидкості руху парів через клапан при зовнішній температурі від $(+40)^{\circ}\text{C}$ до $(-20)^{\circ}\text{C}$.

На рис. 1 приведено розраховані залежності радіусу d ВНЗ класу 1 від швидкості руху парів W_g через отвір дихального клапану резервуару з бензином при різних температурах навколишнього середовища та дифузному розсіюванні парів бензину в атмосфері (суцільна лінія). Залежності отримано з використанням номограми рис. D.1 Ed.2.0 ІЕС 60079-10-1 (EN 60079-10-1). Видно, що збільшення або зменшення температури призводить до незначної зміни радіусу d ВНЗ. Тому, подальше дослідження здійснювалося лише для нормальних умов навколишнього середовища. Для порівняння на рис.1 також приведено аналогічні залежності, розраховані методом визначення гіпотетичного об'єму при коефіцієнті безпеки $k = 0,25$ та коефіцієнті ефективності розсіювання $f = 3,0$ ВС, рекомендованих у

цьому випадку для подібних ЗУ (пунктирна лінія), та залежність, встановлена детермінованим методом (1 м по горизонталі і вертикалі від місця викиду парів ЛЗР для ЗУ [1]). Усі розрахунки проведено за відсутності вітру та ідеальній (сферичній) формі ВНЗ.

Результати розрахунків, проведених вище методом з використанням номограм для первинного витoku BC через отвір дихального клапану (табл. 1) та (рис. 1), можуть бути застосовані й для встановлення умов існування ВНЗ класу 2 та її розмірів у випадку вторинного витoku (виток, що неможливий при нормальних режимах роботи) через дихальний клапан.

Визначимо клас та розмір ВНЗ зовні наземного резервуару з бензином марки А-92 при його аварійній розгерметизації. У цьому випадку ступінь витoku є вторинним, тому має місце або ВНЗ класу 2 або ВНЗ відсутня в залежності від умов вентиляції. Якщо рівень вентиляції є низьким або середнім, то має місце ВНЗ класу 2. Якщо рівень вентиляції є високим, то ВНЗ відсутня.

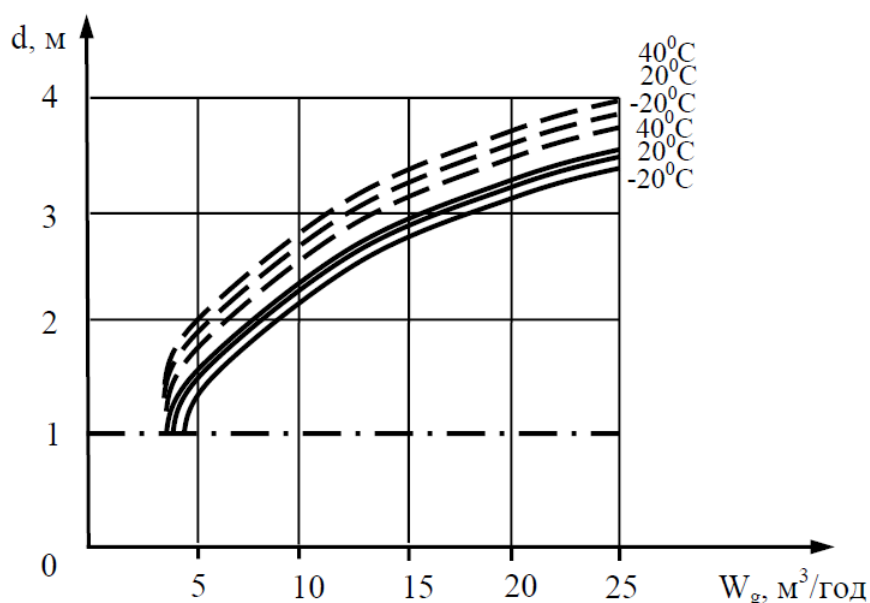


Рис. 1. Залежності радіусу d ВНЗ класу 1 від швидкості руху парів W_g через дихальний клапан резервуару з бензином при різних температурах навколишнього середовища, розраховані методом з використанням номограм (суцільна лінія), методом визначення гіпотетичного об'єму (пунктирна лінія) та детермінованим методом (штрихпунктирна лінія)

Дослідження проводилися при швидкостях витoku бензину в діапазоні від $W = 0,1$ кг/с до $W = 10$ кг/с (можливі аварії катастрофічних розмірів, наприклад, розрив резервуару не розглядалися). Бензин є рідиною, що після витoku випаровується. У загальному випадку швидкість випаровування W_e рідини розраховується в залежності від площі випаровування (розливу), швидкості вітру над поверхнею рідини, тиску парів рідини, молярної маси рідини, температури навколишнього середовища. Метод з використанням номограм допускає приймати швидкість випаровування W_e рівною 2 % від швидкості витoku W . На рис. 2 приведена залежність граничної швидкості вітру $u_{втр}$, вище якої рівень вентиляції є високим, а нижче – середнім або низьким, від швидкості W витoku бензину з резервуару, отримана методом з використанням номограм.

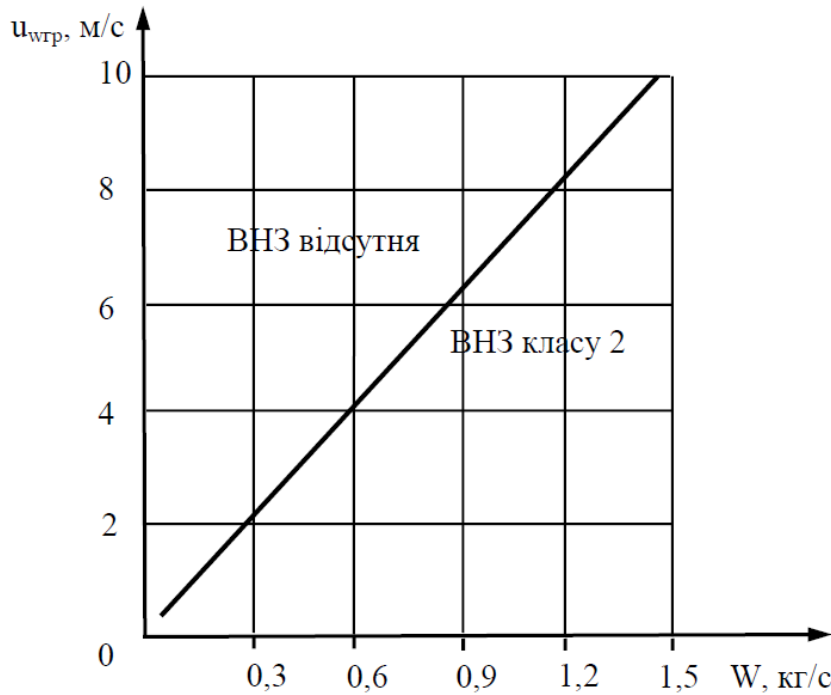


Рис. 2. Залежність граничної швидкості вітру $u_{wгр}$, вище якої рівень вентиляції є високим, від швидкості W витоку бензину з резервуару, розрахована методом з використанням номограм

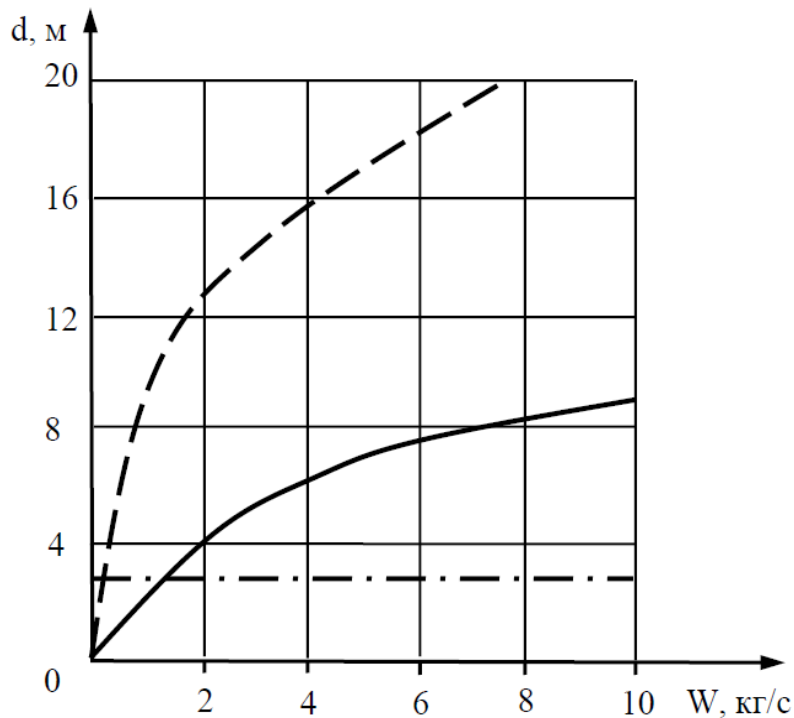


Рис. 3. Залежності радіусу d ВНЗ класу 2 від швидкості W витоку бензину з резервуару при дифузному розсіюванні парів бензину в атмосфері, розраховані методом з використанням номограм (суцільна лінія), методом визначення гіпотетичного об'єму (пунктирна лінія) та детермінованим методом (штрих-пунктирна лінія)

На рис. 3 приведено розраховані залежності радіусу d ВНЗ класу 2 від швидкості W витоку бензину з резервуару при дифузному розсіюванні парів бензину в атмосфері, отримані методом з використанням номограм (суцільна лінія). Також

для порівняння на рис. 3 приведено аналогічні залежності, розраховані методом визначення гіпотетичного об'єму при коефіцієнті безпеки $k = 0,5$ та коефіцієнті ефективності розсіювання $f = 3,0$ ВС, рекомендованих у цьому випадку для подібних ЗУ (пунктирна лінія) та залежність, встановлена детермінованим методом (3 м по горизонталі і вертикалі від закритих технологічних апаратів, заповнених ЛЗР [1]). Усі розрахунки проведено за відсутності вітру та ідеальній (сферичній) формі ВНЗ.

6. Обговорення результатів розрахунку параметрів вибухонебезпечних зон резервуарів зі світлими нафтопродуктами

Класифікація ВНЗ резервуарів зі світлими нафтопродуктами здійснюється різними методами. Порядок застосування розрахункового методу визначення гіпотетичного об'єму та детермінованого методу досліджений у роботі [1].

Згідно розрахункового методу з використанням номограм навколо резервуарів можуть утворюватися ВНЗ трьох класів: 0 (простір, у якому ВС присутнє постійно або протягом тривалого часу або часто), 1 (простір, у якому існує можливість створення ВС під час нормальної роботи), 2 (простір, у якому ВС за нормальних умов експлуатації відсутнє, а якщо воно виникає, то рідко і триває недовго). Для встановлення класів і розмірів ВНЗ використовуються номограми з відповідними вихідними параметрами.

При встановленні класів і розмірів ВНЗ, що створюються навколо резервуарів зі світлими нафтопродуктами досліджуються небезпечні простори всередині резервуару, навколо дихального клапану, що не виключає виток небезпечних парів з резервуару у атмосферу та при аварійній некатастрофічній розгерметизації резервуару. Всередині резервуару має місце ВНЗ класу 0 – простір, у якому ВС присутнє постійно або протягом тривалого часу або часто. Для бензину марки А-92 ВС всередині резервуару присутнє постійно при концентраційних межах поширення полум'я від нижньої $C_H^0 = 1,06$ % об. до верхньої $C_B^0 = 5,5$ % об. Навколо дихального клапану резервуару з бензином має місце або ВНЗ класу 1 якщо виток є первинним (здійснюється заповнення резервуару світлим нафтопродуктом) або ВНЗ класу 2, якщо виток є вторинним (мале дихання резервуару). Найгіршим є випадок відсутності примусового розсіювання ВС (тобто відсутність вітру). У цьому випадку час існування ВНЗ є максимальним. В табл. 1 приведено залежність рівня вентиляції від швидкості руху парів W_g через отвір клапану діаметром $D=50$ мм при різних швидкостях вітру u_w за нормальних умов. При максимально можливій швидкості руху парів $W_g = 25$ м³/год через отвір клапану при швидкості вітру $u_w < 0,03$ м/с рівень вентиляції є низьким та час існування ВНЗ класу 1 після припинення витoku є значним (при вторинному витoku має місце ВНЗ класу 2). Відповідно при швидкості вітру від $u_w = 0,03$ м/с до $u_w = 9,0$ м/с рівень вентиляції є середнім та час існування ВНЗ класу 1 після припинення витoku є звичайним (при вторинному витoku має місце ВНЗ класу 2); при $u_w > 9,0$ м/с рівень вентиляції є високим та час існування ВНЗ зони класу 1 після припинення витoku є незначним (при вторинному витoku ВНЗ відсутня). Аналогічно для швидкості руху парів $W_g = 15$ м³/год рівень вентиляції є високим при швидкості вітру $u_w > 5,0$ м/с; середнім – при швидкості вітру від $u_w = 0,02$ м/с до $u_w = 5,0$ м/с; низьким – при $u_w < 0,02$ м/с відповідно й для

швидкості руху парів $W_g = 5 \text{ м}^3 / \text{год}$ рівень вентиляції є високим при швидкості вітру $u_w > 2,0 \text{ м/с}$; середнім – при швидкості вітру від $u_w = 0,007 \text{ м/с}$ до $u_w = 2,0 \text{ м/с}$; низьким – при $u_w < 0,007 \text{ м/с}$, відповідно.

На рис. 1 побудовано залежності радіусу d ВНЗ класів 1, 2 від швидкості руху парів W_g через дихальний клапан резервуару з бензином при різних температурах навколишнього середовища, отримані різними методами. На рис. 2 побудовано залежність граничної швидкості вітру u_{wgr} , вище якої рівень вентиляції є високим, від швидкості W витоку бензину з резервуару. На рис. 3 побудовано залежності радіусу d ВНЗ класу 2 від швидкості W витоку бензину з резервуару при дифузному розсіюванні парів бензину в атмосфері, отримані різними методами.

З рис. 1 випливає, що при збільшенні швидкості руху парів W_g через отвір дихального клапану збільшення радіусу d ВНЗ відбувається за законом, близьким до логарифмічного. Збільшення температури призводить до незначного збільшення радіусу ВНЗ, зменшення температури – відповідно до його зменшення. Максимально можливий радіус ВНЗ згідно детермінованого методу не перевищує 1 м, тоді як згідно розрахункового методу визначення гіпотетичного об'єму та розрахункового методу з використанням номограм – 4 м. Недоліком метода розрахункового методу з використанням номограм є неможливість встановлення радіусу ВНЗ при малих швидкостях руху парів ($W_g < 5 \text{ м}^3 / \text{год}$). Недоліком детермінованого методу є фіксація радіуса d ВНЗ на мінімально можливому значенні. Результат, отриманий розрахунковим методом визначення гіпотетичного об'єму дає більш високі значення радіусу d ВНЗ у порівнянні з розрахунком методом з використанням номограм.

З рис. 2. видно, що при нормальних умовах швидкість вітру u_w суттєво впливає на умови вентиляції ВНЗ навколо місця аварійного витоку. Залежність граничної швидкості вітру u_{wgr} , вище якої рівень вентиляції є високим, від швидкості W витоку бензину з резервуару має лінійний характер. Вище лінії ВНЗ відсутня, нижче – має місце ВНЗ класу 2.

Аналіз (рис. 3) показує, що при застосуванні розрахункових методів радіус d ВНЗ збільшується при збільшенні швидкості витоку W за законом, близьким до логарифмічного. При цьому радіус ВНЗ d , отриманий розрахунковим методом визначення гіпотетичного об'єму майже у два рази перевищує радіус, визначений розрахунковим методом з використанням номограм. Максимально можливий радіус d ВНЗ, визначений розрахунковим методом з використанням номограм, становить 9 м при $W = 10 \text{ кг/с}$. Максимально можливий радіус d ВНЗ, отриманий розрахунковим методом визначення гіпотетичного об'єму, перевищує 20 м при $W = 10 \text{ кг/с}$. Детермінованим методом радіус d ВНЗ зафіксований на рівні 3 м для усіх швидкостей витоку W .

Критерієм правильності результатів, отриманих різними методами, слід вважати результати експериментальних досліджень, які на цьому етапі не проводилися. Але вже зараз можна зробити висновок, що результати застосування детермінованого методу, детально проаналізованого в [1], не відповідають результатам застосування розрахункового методу визначення гіпотетичного об'єму та розрахункового методу з використанням номограм. Міжнародна електротехнічна комісія рекомендує для застосування розрахунковий метод з використанням номограм.

7. Висновки

1. Проведений аналіз існуючої класифікації вибухонебезпечних зон для резервуарів зі світлими нафтопродуктами. Класи та розміри вибухонебезпечних зон можуть встановлюватися розрахунковим методом визначення гіпотетичного об'єму (метод Ed.1.0 ІЕС 60079-10-1 (EN 60079-10-1)), розрахунковим методом з використанням номограм (метод Ed.2.0 ІЕС 60079-10-1 (EN 60079-10-1)) та детермінованим методом (метод НПАОП 40.1-1.32). Для розрахункового методу з використанням номограм вихідними параметрами для розрахунку є кліматичні умови, властивості небезпечних речовин та режими роботи обладнання, після чого використовуються номограми. Для розрахункового методу визначення гіпотетичного об'єму вихідними параметрами для розрахунку є кліматичні умови, властивості небезпечних речовин та режими роботи обладнання, після чого встановлюється інтенсивність витoku небезпечної речовини, розраховується гіпотетичний об'єм та час існування вибухонебезпечної суміші. Розмір вибухонебезпечної зони визначається величиною гіпотетичного об'єму вибухонебезпечної суміші у співвідношенні до загального об'єму, що вентилюється. Класи та розміри зон за детермінованим методом є фіксованими та незалежними від умов навколишнього середовища.

2. Розрахунковим методом визначення гіпотетичного об'єму, розрахунковим методом з використанням номограм та детермінованим методом встановлено класи і розміри вибухонебезпечних зон резервуарів зі світлими нафтопродуктами залежно від умов їх зберігання, а саме: всередині резервуару, навколо дихального клапану, що не виключає виток небезпечних парів з резервуару у атмосферу та при аварійній некатастрофічній розгерметизації резервуару. Класи та розміри зон за детермінованим методом є фіксованими та незалежними від умов навколишнього середовища. Всередині резервуару має місце вибухонебезпечна зона класу 0. Навколо дихального клапану резервуару залежно від швидкості руху парів через отвір клапану при різних швидкостях вітру за нормальних умов за розрахунковими методами час існування вибухонебезпечної зони є максимальним за відсутності примусового розсіювання вибухонебезпечної суміші. При збільшенні швидкості руху парів через отвір дихального клапану збільшення радіусу вибухонебезпечної зони відбувається за логарифмічним законом. Зміна температури призводить до незначної зміни радіусу. При розгерметизації резервуару збільшення радіусу вибухонебезпечної зони при збільшенні швидкості витoku відбувається також за логарифмічним законом. Радіус зони, отриманий методом визначення гіпотетичного об'єму, майже у два рази перевищує радіус, розрахований методом з використанням номограм. Максимально можливий радіус становить 20 м та 9 м, відповідно, при швидкості витoku бензину 10 кг/с. Детермінованим методом радіус зафіксований на рівні 3 м для усіх умов витoku.

3. Відповідно до національного законодавства на сьогодні обов'язковим для застосування є детермінований метод. Міжнародна електротехнічна комісія рекомендує для застосування розрахунковий метод з використанням номограм. Розрахунки, проведені детермінованим методом, не відповідають результатам, отриманим з використанням розрахункових методів. Розрахунки, проведені методом визначення гіпотетичного об'єму, дають більш високі розміри вибухонебезпечних зон у порівнянні з отриманими методом з використанням номограм. Критерієм правильності результатів, отриманих різними методами, слід вважати результати експериментальних досліджень.

Література

1. Кулаков О. В., Катунін А. М., Ляшевська О. І. Особливості визначення класів і розмірів вибухонебезпечних зон, що створюються навколо зовнішніх установок. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2021. № 33. С. 167–180. URL: <http://pes.nuczu.edu.ua/uk/arkhiv-nomeriv/15-33/111-kulakov-o-v-katunin-a-m-lyashevaska-o-i-osoblivosti-viznachennya-klasiv-i-rozmiriv-vibukhonebezpechnikh-zon-navkolo-zovnishnikh-ustanovok-s-168-181>
2. International Electrotechnical Commission (IEC). HIS Markit Standards Store. URL: <http://www.iec.ch/>
3. National Fire Protection Association (NFPA). URL: <https://www.nfpa.org>
4. British Standards Institution (BSI). URL: <https://www.bsigroup.com/>
5. IEC 60079-10-1: 2020. Explosive atmospheres – Part 10-1: Classification of areas – Explosive gas atmospheres. Geneva. 2020. 236 p. URL: <https://webstore.iec.ch/publication/63327>
6. ANSI/NFPA 70. National Electrical Code. 2020 editor. URL: <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=70>
7. ANSI/NFPA 497. Recommended Practice for the Classification of Flammable Liquids, Gases, or Vapors and of Hazardous (Classified) Locations for Electrical Installations in Chemical Process Areas. 2021 editor. National Fire Protection Association. URL: <http://www.nfpa.org/>
8. ANSI/API RP 505. Recommended Practice for Classification of Locations for Electrical Installations at Petroleum Facilities Classified as Class I, Zone 0, Zone 1, and Zone 2. 2018 editor. American Petroleum Institute, Washington, DC. 177 p. URL: <http://www.nfpa.org/>
9. EI 15. Model code of safe practice Part 15: Area classification code for installations handling flammable fluids. 2015 editor. Energy Institute, London, UK. URL: <https://publishing.energyinst.org/>
10. Bozek A. Application of IEC 60079-10-1 edition 2.0 for Hazardous Area Classification. 2017. Petroleum and Chemical Industry Technical Conference (PCIC), Calgary, AB, Canada. 18–20 Sept. 2017. P. 451–460. doi: 10.1109/TIA.2017.2785258
11. Webber D., Ivings M., Santon R. Ventilation theory and dispersion modelling applied to hazardous area classification. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2011. Vol. 24. № 5. P. 612–621. doi: 10.1016/j.jlp.2011.04.002
12. Tommasini R., Pons E., Palamara F. Area classification for explosive atmospheres: Comparison between European and North American approaches. IEEE transactions on industry applications. 2014. Vol. 50. № 5. P. 3128–3134. doi: 10.1109/TIA.2014.2306980
13. Estellito R., Moreira L., Leao H. Area classification is not a copy-and-paste process: performing reliable hazardous area classification studies. IEEE IAS Industry Applications Magazine. 2016 (Jan/Feb). Vol. 22. P. 28–39. doi: 10.1109/MIAS.2015.2458335
14. Dong L., Zuo H., Hu L., Yang B., Li L., Wu L. Simulation of heavy gas dispersion in a large indoor space using CFD model. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2017. Vol. 46. P. 1–12. doi:10.1016/j.jlp.2017.01.012
15. Cheng C., Tan W., Liu L. Numerical simulation of water curtain application for ammonia release dispersion. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2014 (July). Vol. 30. P. 105–112. doi: 10.1016/j.jlp.2014.05.003

16. IEC 62305-1: 2010. Protection against lightning – Part 1: General principles. Geneva. 2010. 137 p. URL: <https://webstore.iec.ch/publication/6793>
17. IEC 62305-2: 2010. Protection against lightning – Part 2: Risk management. Geneva. 2010. 171 p. URL: <https://webstore.iec.ch/publication/6794>
18. IEC 62305-3: 2010. Protection against lightning – Part 3: Physical damage to structures and life hazard. Geneva. 2010. 313 p. URL: <https://webstore.iec.ch/publication/6795>
19. IEC 62305-4: 2010. Protection against lightning – Part 4: Electrical and electronic systems within structures. Geneva. 2010. 178 p. URL: <https://webstore.iec.ch/publication/6796>
20. ISO/IEC 80079-20-1: 2017. Explosive atmospheres – Part 20-1: Material characteristics for gas and vapour classification – Test methods and data. Geneva. 2017. 167 p. URL: <https://www.iso.org/standard/69556.html>

*O. Kulakov, PhD, Associate Professor, Researcher of the Department
A. Katunin, PhD, Senior Researcher, Lecturer of the Department
Yu. Mykhailovska, PhD, Senior Researcher of the Department
National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine*

RESEARCH OF PARAMETERS OF EXPLOSIVE ZONES OF RESERVOIRS WITH LIGHT OIL PRODUCTS

Classes and sizes of explosive zones of reservoirs are set with light oil products depending on the terms of their storage: into a reservoir, round respiratory to the valve that does not eliminate the coil of dangerous vapour from a reservoir in an atmosphere, and during rapid uncatastrophic depressurization of reservoir. Calculations came true by three methods: by the calculation method of determination of hypothetical volume, calculation method with the use of nomograms and determined method. The calculations executed by the determined method do not answer the results got with the use of calculation methods. Calculations, determinations of hypothetical volume conducted by a method, the high sizes of explosive zones give pain in comparing to got a method with the use of nomograms. Classes and sizes of zones after the determined method are fixed and case insensitive environment. Into a reservoir the explosive zone of class takes place 0. Round a respiratory to the valve reservoir depending on the rate of movement evaporation through opening to the valve at different speeds of wind at normal terms after calculation methods time of existence of explosive zone is maximal in default of the forced dispersion of explosive mixture. At the increase of rate of movement evaporation through opening of respiratory to the valve increase of radius of explosive zone it takes place on a logarithmic law. The change of temperature results in the insignificant change of radius. During depressurization of reservoir of increase of radius of explosive zone at the increase of speed of source takes place also on a logarithmic law. Radius of zone, got the method of determination of hypothetical volume have in two times exceeds the radius expected by a method with the use of nomograms. A maximally possible radius presents a 20 m and 9 m accordingly at speed of source of petrol 10 kg/s a radius is fixed the Determined method at the level of a 3 m for all terms of source.

Keywords: explosive zone, reservoir, light oil products, explosive environment, wind speed, speed of source

References

1. Kulakov, O. V., Katunin, A. M., Lyashevskaya, O. I. (2021). Osoblyvosti vyznachennia klasiv i rozmiriv vybukhonebezpechnykh zon, shcho stvoriuiutsia navkolo zovnishnikh ustanovok. Problemy nadzvychainykh sytuatsii, 33, 167–180.
2. HIS Markit Standards Store. (2022). International Electrotechnical Commission (IEC). Retrieve from <https://global.ihc.com/standards.cfm?publisher=IEC>
3. National Fire Protection Association (NFPA). (2022). Retrieve from <https://www.nfpa.org>

4. British Standards Institution (BSI). (2022). Retrieve from <https://www.bsigroup.com/>
5. IEC 60079-10-1. (2020). Explosive atmospheres – Part 10-1: Classification of areas – Explosive gas atmospheres, 226. Retrieve from <https://webstore.iec.ch/publication/63327>
6. ANSI/NFPA 70. (2020). National Electrical Code. Retrieve from.
7. ANSI/NFPA 497. (2021). Recommended Practice for the Classification of Flammable Liquids, Gases, or Vapors and of Hazardous (Classified) Locations for Electrical Installations in Chemical Process Areas. Retrieve from <http://www.nfpa.org>
8. ANSI/API RP 505. (2018). Recommended Practice for Classification of Locations for Electrical Installations at Petroleum Facilities Classified as Class I, Zone 0, Zone 1, and Zone 2, 177. Retrieve from <http://www.nfpa.org>
9. EI 15. (2015). Model code of safe practice Part 15: Area classification code for installations handling flammable fluids. Retrieve from. <https://publishing.energyinst.org>
10. Bozek, A. (2017). Application of IEC 60079-10-1 edition 2.0 for Hazardous Area Classification. Petroleum and Chemical Industry Technical Conference (PCIC), Calgary, AB, Canada, 18–20 Sept. 2017, 451–460. doi: 10.1109/TIA.2017.2785258
11. Webber, D., Ivings, M., Santon, R. (2011). Ventilation theory and dispersion modelling applied to hazardous area classification. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 24, 5, 612–621. doi: 10.1016/j.jlp.2011.04.002
12. Tommasini, R., Pons, E., Palamara, F. (2014). Area classification for explosive atmospheres: Comparison between European and North American approaches. *IEEE transactions on industry applications*, 50, 5, 3128–3134. doi: 10.1109/TIA.2014.2306980
13. Estellito, R., Moreira, L., Leao, H. (2016). Area classification is not a copy-and-paste process: performing reliable hazardous area classification studies. *IEEE IAS Industry Applications Magazine*, 22, 28–39. doi: 10.1109/MIAC.2015.2458335
14. Dong, L., Zuo, H., Hu, L., Yang, B., Li, L., Wu, L. (2017). Simulation of heavy gas dispersion in a large indoor space using CFD model. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 46, 1–12. doi: 10.1016/j.jlp.2017.01.012
15. Cheng, C., Tan, W., Liu, L. (2014). Numerical simulation of water curtain application for ammonia release dispersion. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 30, 105–112. doi: 10.1016/j.jlp.2014.05.003
16. IEC 62305-1. (2010). Protection against lightning – Part 1: General principles, 137. Retrieve from <https://webstore.iec.ch/publication/6793>
17. IEC 62305-2. (2010). Protection against lightning – Part 2: Risk management, 171. Retrieve from <https://webstore.iec.ch/publication/6794>
18. IEC 62305-3. (2010). Protection against lightning – Part 3: Physical damage to structures and life hazard, 313. Retrieve from <https://webstore.iec.ch/publication/6795>
19. IEC 62305-4. (2010). Protection against lightning – Part 4: Electrical and electronic systems within structures, 178. Retrieve from <https://webstore.iec.ch/publication/6796>
20. ISO/IEC 80079-20-1. (2017). Explosive atmospheres – Part 20-1: Material characteristics for gas and vapour classification – Test methods and data, 176. Retrieve from <https://www.iso.org/standard/69556.html>

Надійшла до редколегії: 20.04.2022

Прийнята до друку: 16.06.2022