

УДК 614.84

О. В. Кулаков, к.т.н., доцент, с.н.с. відділу (ORCID 0000-0001-5236-1949)
Ю. В. Михайловська, PhD, с.н.с. відділу (ORCID 0000-0003-1090-5033)
А. М. Катунін, к.т.н., с.н.с., доцент каф. (ORCID 0000-0003-2171-4558)
О. М. Роянов, к.т.н., доцент, ст. викл. каф. (ORCID 0000-0001-7631-1030)
Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

ВСТАНОВЛЕННЯ ВІДПОВІДНОСТІ МІЖНАРОДНОГО ТА НАЦІОНАЛЬНОГО МЕТОДІВ КЛАСИФІКАЦІЇ ГАЗОПАРОВОПІТРЯНИХ ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ ЗОН

Виявлені розбіжності міжнародного та національного методів класифікації газопароповітряних вибухонебезпечних зон (метод остаточної редакції ДСТУ EN ІЕС 60079-10-1 та метод НПАОП 40.1-1.32) на прикладі приміщень насосних станцій для перекачування світлих нафтопродуктів. При застосуванні міжнародного методу може утворюватися або вибухонебезпечна зона класу 1, або вибухонебезпечна зона класу 2, або вибухонебезпечна зона не утворюється. Клас зони залежить від масової швидкості витoku бензину та швидкості вентиляції (при високій масовій швидкості витoku бензину та низькій швидкості вентиляції утворюється зона класу 1; при збільшенні швидкості вентиляції та незмінності швидкості витoku бензину або створюється зона класу 2 або умови для її створення відсутні). Вибухонебезпечна зона класу 2 набуває значних розмірів тільки при значних аварійних витоках (зокрема має місце на відстані 5 м при сумарній масовій швидкості витoku 132,81 г на 1 кг бензину, що перекачується). Вибухонебезпечна зона займає усе приміщення тільки у випадку перевищення її розміру геометричних розмірів приміщення з урахування місця викиду небезпечної речовини. Час існування вибухонебезпечної зони залежить від стаціонарної фонові концентрації бензину за логарифмічним законом. Кратність повітрообміну у приміщенні суттєво впливає на час існування вибухонебезпечної зони. При застосуванні національного методу у приміщенні може утворюватися або вибухонебезпечна зона класу 2 або вибухонебезпечна зона відсутня. Критерії утворення вибухонебезпечної зони різними методами суттєво відрізняються. Усунення виявлених розбіжностей можливе або повним переходом на європейські технологічні регламенти зі скасуванням національного методу розрахунку або вбудовуванням міжнародного методу розрахунку в наявні національні правила після їх комплексної технічної експертизи.

Ключові слова: вибухонебезпечна зона, вибухонебезпечне середовище, насосна станція, номограма, приміщення, світлі нафтопродукти

1. Вступ

Вихідним етапом забезпечення безпечної роботи електроустановок є їх улаштування залежно від реальних умов експлуатації. Згідно національних правил улаштування електроустановок усі простори, в яких можуть експлуатуватися електроустановки, розділено на вибухонебезпечні зони (ВЗ), пожежонебезпечні зони та інші простори (невибухо- й непожежонебезпечні). Враховуючі, що ВЗ характеризуються обертанням значної кількості небезпечних речовин (горючих газів, легкозаймистих рідин (ЛЗР) та вибухонебезпечного пилу), електроустановки у ВЗ уявляють підвищену безпеку.

Тому забезпечення вибухо- та пожежної безпеки об'єктів з вибухонебезпечними зонами є актуальною проблемою.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В Європі вибухонебезпечні зони класифіковано відповідно до стандартів Міжнародної електротехнічної комісії (International Electrotechnical Commission (IEC)) [1], у Великій Британії – Британського інституту стандартів (British Standards Institution (BSI)) [2], в Сполучених Штатах Америки – Національної протипожеж-
Fire safety. DOI: 10.52363/2524-0226-2023-37-8

ної асоціації (National Fire Protection Association (NFPA)) [3], Канаде – Канадської асоціації стандартів (Canadian Electrical Code of Canadian Standards Association (CSA)) [4] тощо. Як правило, питання визначення класів та розмірів ВЗ в науковій літературі стає актуальним тільки після прийняття нових редакцій міжнародних або національних норм.

Так, в роботі [5] з метою виявлення особливостей різних підходів до забезпечення вибухопожежної безпеки об'єктів з ВЗ проведено порівняння методів встановлення класів та розмірів ВЗ документами ІЕС (міжнародні методи другої та першої редакцій ІЕС 60079-10-1 (EN 60079-10-1)), NFPA (національні методи ANSI/NFPA 497 та ANSI/API RP 505) та BSI (національний метод EI 15). Порівняння здійснювалося для прикладів, описаних в додатку до другої редакції ІЕС 60079-10-1 (EN 60079-10-1). Слід відмітити, що згідно вимог ІЕС класифікація газопароповітряних ВЗ здійснюється ІЕС 60079-10-1, класифікація пилоповітряних ВЗ – ІЕС 60079-10-2. ІЕС 60079-10-1 пройшов три редагування (перше – 2008 рік, друге – 2015 рік, третє – 2020 рік). Найбільш суттєвою зміною в класифікації слід вважати прийняття другої редакції ІЕС 60079-10-1, що виразилося в переході від методу розрахунку величини гіпотетичного об'єму (використовувався для встановлення класу та розміру газопароповітряної ВЗ ще починаючи від стандарту ІЕС 79-10, вперше опублікованого у 1972 році) до методу з використанням номограм. Стандарт ІЕС 60079-10-2 пройшов два редагування (перше – 2009 рік, друге – 2015 рік). Недоліком роботи можна вважати те, що автори обмежились дослідженням стандартних прикладів, описаними в додатку до другої редакції ІЕС 60079-10-1.

В роботі [6] для уточнення розмірів ВЗ пропонується використання інструментального методу виявлення місця та меж витoku небезпечних речовин. Обговорюється можливість блокування обладнання, небезпечного по витoku, для зменшення розмірів ВЗ. Приводяться посилання на методи і стандарти ІЕС та Північної Америки для встановлення класів й розмірів ВЗ. Однак, метод встановлення класів та визначення розмірів ВЗ, що використовується в роботі, був діючим на час її написання. У 2020 році була прийнята третя редакція ІЕС 60079-10-1 (EN 60079-10-1) з третьою остаточною на сьогодні редакцією міжнародного методу ІЕС (модифікований метод з використанням номограм), тому на сьогодні є не актуальним.

В роботі [7] проаналізовано канадські електротехнічні норми та правила щодо класифікації ВЗ. У 2015 році Канада перейшла від американської класифікації ВЗ на європейську. Аналізуються проблеми, що виникли внаслідок цього переходу. Недоліком роботи можна вважати відсутність конкретних прикладів встановлення класів та розмірів ВЗ. В роботі [8] проведено гідродинамічне моделювання (computational fluid dynamic (CFD)) розміру ВЗ. Показано, що розмір ВЗ є функцією молярної витрати небезпечного газу та об'ємної долі газу при нижній концентраційній межі поширення полум'я (НКМПП). Результати розрахунків порівнювалися з відомими з літературних джерел даними. Недоліком роботи можна вважати обмежені умови застосування CFD моделювання для встановлення розмірів ВЗ.

Метою роботи [9] є дослідження точності математичних моделей щодо визначення розміру ВЗ на промислових об'єктах з використанням горючих газів. Недооцінка ВЗ може призвести до вибухів, а переоцінка призводить до зайвих витрат. Автори показали, що розміри ВЗ, отримані за допомогою нормованих методів, є більшим у порівнянні з результатами, отриманими методом обчислювальної гідродинаміки (CFD model). Тобто нормовані методи визначають розмір ВЗ «з за-

пасом», що з одного боку підвищує безпеку, а з іншого – призводить до зайвих витрат. Недоліком роботи можна вважати те, що вона спрямована на зменшення економічних витрат на улаштування обладнання у ВЗ, а не на підвищення рівня безпеки.

Отже загальним недоліком робіт [5–9] можна вважати використання вже застарілих на сьогодні міжнародних методів ІЕС встановлення класів та розрахунку розмірів ВЗ.

В роботі [10] запропоновано нову емпіричну модель викиду небезпечних газів на відкритих просторах. Проведено аналіз оцінки внеску кожного параметру, що характеризує викид (температура та тиск зберігання, діаметр отвору витoku, молекулярна маса газу, швидкість вітру тощо), на розмір газової хмари (ВЗ). Запропонована модель апробована для викиду водню на відкритому просторі. Недоліком є те, що дослідження не порівнювалися з результатами розрахунків нормованими методами.

В роботі [11] авторами досліджено класи та розміри ВЗ для зовнішніх установок на прикладі 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. В Україні з 01 вересня 2018 року діє національний стандарт ДСТУ EN 60079-10-1, який прийнятий методом підтвердження і є ідентичним другій редакції ІЕС 60079-10-1, а з 31 грудня 2023 року надано чинності ДСТУ EN ІЕС 60079-10-1, який також прийнятий методом підтвердження і є ідентичним третій редакції ІЕС 60079-10-1. Обов'язковість застосування національних стандартів на території України не вимагається (застосування є добровільним). На сьогодні паралельно з ДСТУ EN 60079-10-1 в країні діють обов'язкові правила НПАОП 40.1-1.32, введені в дію з 01 січня 2002 року, з національним методом встановлення класів та розмірів ВЗ, що використовує окремі вимоги третьої редакції ІЕС 79-10, опублікованої у 1995 році. В роботі [11] дослідження проводилися трьома методами: міжнародним методом з використанням номограм (друга редакція ІЕС 60079-10-1), міжнародним методом встановлення величини гіпотетичного об'єму ВС (перша редакція ІЕС 60079-10-1) та національним методом НПАОП 40.1-1.32. Результати, отримані національним методом НПАОП 40.1-1.32 суттєво відрізняються від результатів, отриманих міжнародними методами. Розрахунки, отримані міжнародним методом встановлення величини гіпотетичного об'єму ВС, дають більші розміри ВЗ у порівнянні з отриманими міжнародним методом з використанням номограм. Недоліками роботи є те, що дослідження обмежено зовнішніми установками та застосуванням вже застарілої на сьогодні редакції міжнародного методу ІЕС 60079-10-1 встановлення класів та розрахунку розмірів ВЗ.

Таким чином, важливою, але недослідженою частиною проблеми, що розглядається, є відсутність відомостей щодо відповідності міжнародного та національного методів класифікації газопароповітряних ВЗ у приміщеннях.

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є виявлення причин розбіжностей класифікації газопароповітряних вибухонебезпечних зон у приміщеннях при застосуванні міжнародного та національного методів розрахунку на прикладі приміщень насосних станцій для перекачування світлих нафтопродуктів та знаходження шляхів їх усунення.

Для досягнення мети роботи поставлені наступні завдання:

- визначити умови встановлення класів вибухонебезпечних зон при використанні міжнародного та національного методів;
- оцінити відповідність параметрів вибухонебезпечних зон залежно від технологічних режимів роботи при використанні міжнародного та національного методів розрахунку.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є методи класифікації вибухонебезпечних зон у приміщеннях.

Предметом дослідження є розбіжності міжнародного та національного методів класифікації вибухонебезпечних зон у приміщеннях.

В Україні офіційно діючими є два методи визначення класів та параметрів вибухонебезпечних зон у приміщеннях (метод з використанням номограм ДСТУ EN IEC 60079-10-1, що є ідентичним міжнародному методу EN 60079-10-1, та національний метод НПАОП 40.1-1.32).

Згідно міжнародного методу газо-, пароповітряні ВС можуть за певних обставин утворювати у приміщеннях ВЗ 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). Згідно національного методу газо-, пароповітряні ВС можуть утворювати у приміщеннях ВЗ двох класів: 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). Найсучаснішим є міжнародний метод.

Згідно міжнародного методу спочатку визначаються вихідні параметри: властивості ЛЗР (молярна маса M , НКМПП LFL , температура спалахування AIT , густина ρ , щільність парів ρ_g) та кліматичні умови (атмосферний тиск та температура навколишнього середовища).

На другому етапі розрахунку встановлюється ступінь витoku небезпечної речовини (безперервний, першого або другого ступеня). При безперервному витoku небезпечної речовини (виток, що існує постійно, наприклад, поверхня над рівнем рідини в резервуарі з постійно відкритим вентиляційним клапаном) створюється, як правило, ВЗ класу 0. При витoku першого ступеня небезпечної речовини (виток, що є випадковим при нормальному режимі роботи, наприклад, ущільнення насосів, клапанів, фланцеві з'єднання з можливим витком ЛЗР при нормальній роботі; вентиляція відсутня) створюється ВЗ класу 1. При витoku другого ступеня небезпечної речовини (виток, не можливий при нормальних режимах роботи, наприклад, ущільнення насосів, клапанів, фланцеві з'єднання за відсутності витoku ЛЗР при нормальній роботі) створюється ВЗ класу 2 залежно від умов вентиляції. Розраховується можлива масова швидкість витoku W ЛЗР 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, є характеристикою джерела витoku, звичайно для нестандартних отворів $0,50 \div 0,75$, для отворів правильної форми (круглих) $0,95 \div 0,99$;

S – площа поперечного перерізу отвору, через який відбувається виток, м^2 ; ρ – густина ЛЗР, $\text{кг}/\text{м}^3$; Δp – різниця тиску в отворі, з якого здійснюється виток, Па .

Визначається масова швидкість випаровування W_g ЛЗР за формулою:

$$W_g = \frac{6,55 \cdot u_w^{0,78} \cdot A_p \cdot p_v \cdot M^{0,667}}{R \cdot T}, \text{ кг / с}, \quad (2)$$

де u_w , $\text{м}/\text{с}$ – швидкість вітру над поверхнею рідини, що розлилася; A_p , м^2 – площа випаровування; p_v , кПа – тиск насичених парів рідини при температурі T ; M , $\text{кг}/\text{кмоль}$ – молярна маса рідини; $R = 8,3 \cdot 10^3$ $\text{Дж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$ – універсальна газова константа; T , К – абсолютна температура рідини.

Замість формули (2) дозволяється використання довідкових даних.

Визначається об'ємна швидкість випаровування ЛЗР Q_g за формулою:

$$Q_g = \frac{W_g}{\rho_g}, \text{ м}^3 / \text{с}. \quad (3)$$

Визначається об'ємна характеристика витоку Q_c за формулою:

$$Q_c = \frac{W_g}{\rho_g \cdot \text{LFL}}, \text{ м}^3 / \text{с}. \quad (4)$$

На третьому етапі розрахунку визначаються характеристики приміщення, а саме: умови всередині приміщення (наявність та тип вентиляції), тиск, абсолютна температура, геометричні розміри приміщення, критична концентрація X_{crit} та розраховуються об'ємна витрата повітря Q_a , швидкість вентиляції u_w .

X_{crit} – довільне значення нижче НКМПП, наприклад, значення, при якому газосигналізатор подає тривогу (звичайно, $X_{\text{crit}} = 0,25 \cdot \text{LFL}$).

Вентиляція може бути природною та за рахунок ефекту тяги. Для природної вентиляції:

$$Q_a = C_d \cdot A_e \cdot u_w \cdot \sqrt{\Delta C_p}, \text{ м}^3 / \text{с}, \quad (5)$$

де $A_e = \sqrt{\frac{A_1^2 \cdot A_2^2}{A_1^2 + A_2^2}}$, м^2 – еквівалентна ефективна площа пройми з навітряної та підвітряної сторін на однаковій висоті; A_1 , м^2 – площа отворів з навітряної сторони; A_2 , м^2 – площа отворів з підвітряної сторони; u_w , $\text{м}/\text{с}$ – швидкість вітру на заданій висоті або швидкість вентиляції; ΔC_p , безрозмірний – коефіцієнт тиску, характерний для приміщення.

Для ефекту тяги:

$$Q_a = C_d \cdot A_e \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot \Delta T}{T_{in} + T_{out}}} \cdot g \cdot H, \text{ м}^3 / \text{с}, \quad (6)$$

де $\Delta T, K$ – різниці між температурою всередині та зовні приміщення; T_{in}, K – температура всередині приміщення; T_{out}, K – температура зовні приміщення; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння; $H, \text{ м}$ – відстань по вертикалі між серединами нижньої та верхньої пройми.

Швидкість вентиляції розраховується за формулою:

$$u_w = \frac{Q_a}{L \cdot H}, \text{ м/с}. \quad (7)$$

Розрахунок закінчується встановленням наслідків витоку.

Для розрахунку ефективності вентиляції вводиться поняття безрозмірного коефіцієнту неефективності вентиляції f , який знаходиться в межах від 1 до 5. Найефективнішою є вентиляція, за якої $f = 1$ (фонова концентрація практично однорідна, випускний отвір вентиляції знаходиться на відстані від місця витоку та вихідна концентрація близька до фонові). Якщо у приміщенні наявний градієнт фонові концентрації внаслідок неефективної вентиляції, вихідний отвір вентиляції знаходиться на відстані від місця витоку та вихідна концентрація є меншою від фонові концентрації, то f може знаходитися в межах від $f = 1,5$ (помірно неефективна вентиляція) до $f = 5$ (зовсім неефективна вентиляція).

Здійснюється розрахунок фонові концентрації X_b за формулою:

$$X_b = \frac{f \cdot Q_g}{Q_2}, \text{ об./об.}, \quad (8)$$

де $Q_2 = C \cdot V_0, \text{ м}^3 / \text{с}$ – об'ємна витрата пароповітряної суміші, що виходить з приміщення.

Порівнюються концентрації X_b та X_{crit} й за номограмою рис. С.1 ДСТУ EN ІЕС 60079-10-1 залежно від величини об'ємної характеристики витоку Q_c та швидкості вентиляції (вітру) u_w встановлюється ступінь розбавлення (високий, середній або низький). Далі за таблицею Д.1 ДСТУ EN ІЕС 60079-10-1 залежно від ступеня витоку (постійний, першого або другого ступеня) ступеня розбавлення (високий, середній або низький) встановлюється клас ВЗ (0, або 1, або 2). Таким чином, регулюючи швидкість вентиляції можливо змінювати клас ВЗ.

При середньому та низькому розбавленні здійснюється розрахунок часу існування ВЗ за формулою:

$$t_d = \frac{f}{C} \cdot \ln\left(\frac{X_b}{X_{crit}}\right), \text{ с}, \quad (9)$$

де $C = \frac{Q_a}{V_0}, \text{ с}^{-1}$ – кратність повітрообміну.

Розмір ВЗ встановлюється за номограмою рис. D.1 ДСТУ EN ІЕС 60079-10-1 залежно від об'ємної характеристики витoku Q_c та властивостей джерела витoku (важкий газ або пара, дифузний газ або пара або газовий (паровий) струмінь). Форма ВЗ встановлюється за рис. додатку А.2 ДСТУ EN ІЕС 60079-10-1.

Згідно національного методу у приміщенні, де обертається газопароповітряна ВС, може утворюватися або ВЗ класу 1 або ВЗ класу 2 або ВЗ відсутня. ВЗ класу 1 може створюватися за нормальних умов роботи технологічного обладнання. Авторам невідомі технологічні умови, за яких у приміщенні допускається створення ВС за нормальних режимів роботи.

Клас і розмір ВЗ класу 2 у приміщенні залежать від розрахункового надлишкового тиску вибуху ΔP газо-, пароповітряної ВС (визначається галузевими нормами технологічного проектування, наприклад, ДСТУ Б В.1.1-36). При $\Delta P > 5$ кПа ВЗ класу 2 займає весь об'єм приміщення. При $0,5$ кПа $< \Delta P \leq 5$ кПа ВЗ займає частину об'єму приміщення і допускається приймати її в межах до 5 м по вертикалі і горизонталі від технологічного апарату, з якого можливий викид горючих газів або парів ЛЗР. При $\Delta P \leq 0,5$ кПа ВЗ відсутня. Поняття «рідко і триває недовго» у визначенні ВЗ класу 2 є невизначеним.

Враховуючі, що фізичний та математичний апарати міжнародного та національного методів суттєво відрізняються, можна висунути гіпотезу, що результати їх застосування також не будуть відповідати один одному.

Для встановлення відповідності міжнародного та національного методів класифікації газопароповітряних вибухонебезпечних зон застосуємо метод порівняльних розрахунків при встановленні класів та визначенні розмірів ВЗ на прикладі типового вибухонебезпечного об'єкту. Розрахунки проводитимуся засобами обчислювальної техніки з використанням програми Mathcad.

5. Визначення умов встановлення класів вибухонебезпечних зон міжнародним та національними методами

Визначимо умови встановлення класів ВЗ міжнародним та національними методами на прикладі приміщень насосних станцій для перекачування світлих нафтопродуктів та проведемо їх порівняння.

Насосні станції для перекачування світлих нафтопродуктів характеризуються обертанням значної кількості ЛЗР. Національними нормами проектування складів нафти і нафтопродуктів ВБН В.2.2-58.1 встановлено максимально припустима кількість витoku на одиницю засобу перекачки у кількості 0,26 г на 1 кг бензину, що перекачується. Згідно типового проекту в Україні у насосних станціях звичайно встановлюється не менше двох основних насосних агрегатів (звичайно 6НКЭ-9x1) та двох допоміжних насосних агрегатів (звичайно вихровий самоусмоктувальний насос СВН-80 та вакуум-насос ВВН-3). Згідно паспортних даних один основний насосний агрегат 6НКЭ-9x1 має продуктивність перекачування $V_{пер} = 100$ м³/год. Тому максимально припустима швидкість витoku на один насосний агрегат складає $W = 5,3 \cdot 10^{-3}$ кг/с (при щільності бензину $\rho = 740$ кг/м³).

На рис. 1 приведено залежність класу ВЗ від масової швидкості витoku W бензину та швидкості вентиляції u_w для приміщення насосної станції для перекачування світлих нафтопродуктів з насосними агрегатами 6НКЭ-9x1, розрахована міжнародним методом.

Згідно національного методу у приміщенні насосної станції для перекачу-

вання світлих нафтопродуктів для визначення класу ВЗ застосовується інший підхід: необхідно розрахувати надлишковий тиск вибуху ΔP газо- пароповітряної ВС у разі виникнення умовної аварії, критерієм якої обирається найбільш несприятливий варіант аварії, при якому у вибуху бере участь найбільша кількість речовин або матеріалів, найбільш небезпечних по наслідках вибуху (наприклад, відбувається розгерметизація напірного трубопроводу одразу після основного насосного агрегату, увесь бензин надходить у приміщення насосного залу; аварійна вентиляція не працює, відбувається випаровування з поверхні бензину, що розлився, тривалість випаровування рідини приймається рівної часу її повного випаровування, але не більш 3600 с). Проведені розрахунки показали, що при таких вихідних умовах при швидкостях вентиляції, аналогічних приведеним по осі ординат на рис. 1, надлишковий тиск вибуху ΔP перебільшує 5 кПа.

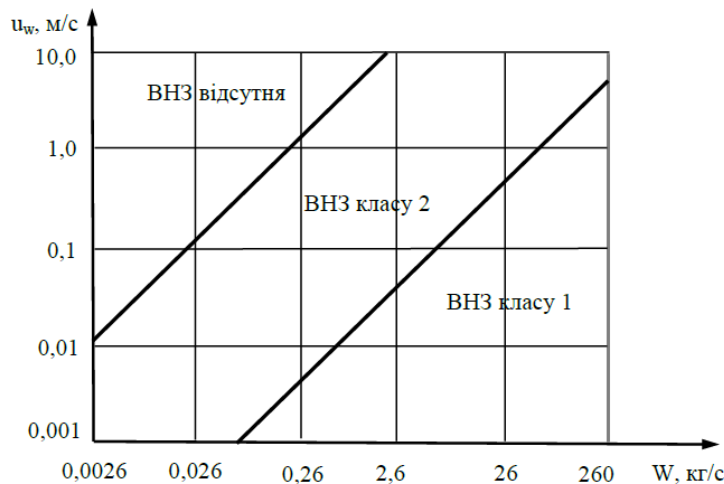


Рис. 1. Залежність класу ВЗ від масової швидкості витoku W бензину та швидкості вентиляції u_w для приміщення насосної станції для перекачування світлих нафтопродуктів з насосними агрегатами БНКЭ-9х1

Розрахуємо надлишковий тиск вибуху ΔP при максимально припустимій нормативній кількості витoku на один насосний агрегат 0,26 г на 1 кг бензину, що перекачується. Інтенсивність випаровування бензину визначається по формулі (13) ДСТУ Б В.1.1-36 (збережено позначення величин з ДСТУ Б В.1.1-36, які відрізняються від позначень ДСТУ EN ІЕС 60079-10-1):

$$W = 10^{-6} \cdot \eta \cdot \sqrt{M} \cdot P_H, \quad (10)$$

де коефіцієнт $\eta = 1,0$ при $t = 20$ °С; $M = 113,3$ кг/кмоль – молярна маса бензину А-95;

$P_H = 0,133 \cdot 10^{\left(\frac{A-B}{C_A+t_p}\right)}$ – тиск насичених парів бензину А-95, кПа (формула (14) ДСТУ Б В.1.1-36). За розрахунком інтенсивність випару бензину з поверхні розливу дорівнює $W = 0,25 \cdot 10^{-3}$ кг \cdot с $^{-1}$ \cdot м $^{-2}$.

Швидкість випаровування бензину з підлоги перебільшує максимально припустиму швидкість витoku з одного насосного агрегату $W = 5,3 \cdot 10^{-3}$ кг/с при площі підлоги більше $F_{\text{підлога}} = 21,2 \text{ м}^2$ (для двох насосних агрегатів – у два рази більше відповідно).

6. Оцінка відповідності параметрів вибухонебезпечних зон, отриманих міжнародним та національним методами

Параметрами, що характеризують ВЗ, є розмір r ВЗ та час t_d існування ВЗ (точніше час, необхідний для зниження встановленої стаціонарної фонові концентрації X_b горючої речовини до значення критичної концентрації $X_{crit} = 0,25 \cdot LFL$).

Оцінку відповідності параметрів ВЗ при застосуванні міжнародного та національного методів проведемо на прикладі приміщень насосних станцій для перекачування світлих нафтопродуктів.

На рис. 2 приведена залежність розміру r ВЗ від масової швидкості витоку W бензину для приміщення насосної станції для перекачування світлих нафтопродуктів з насосними агрегатами БНКЭ-9х1, розрахована міжнародним методом.

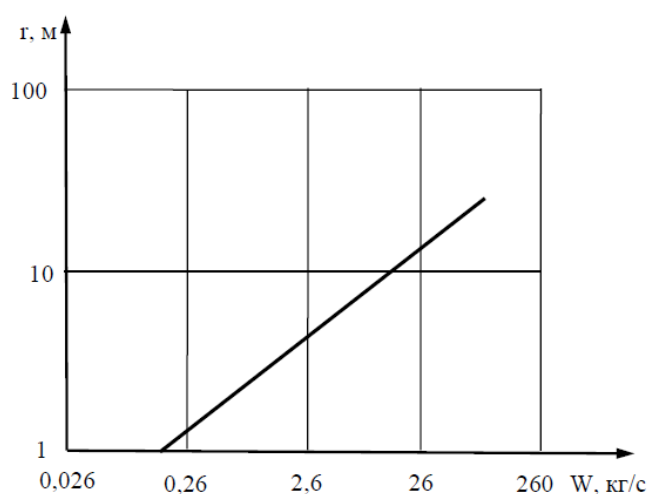


Рис. 2. Залежності розміру r ВЗ від масової швидкості витоку W бензину для приміщення насосної станції для перекачування світлих нафтопродуктів з насосними агрегатами БНКЭ-9х1

Як показано у попередньому розділі при максимально припустимій нормативній кількості витоку на один насосний агрегат 0,26 г на 1 кг бензину, що перекачується, надлишковий тиск вибуху $\Delta P \leq 0,5$ кПа.

Час існування t_d ВЗ методом з використанням номограм розраховується за формулою (9) при середньому та низькому розбавленні ВС.

На рис. 3 приведена залежність часу існування t_d ВЗ від стаціонарної фонові концентрації X_b бензину при критичній концентрації $X_{crit} = 0,25 \cdot LFL$ для різних кратностей повітрообміну C для приміщення насосної станції для перекачування світлих нафтопродуктів з насосними агрегатами БНКЭ-9х1.

Для розуміння зв'язку стаціонарної фонові концентрації X_b з масовою швидкістю витоку W бензину на рис. 4 приведена залежність стаціонарної фонові концентрації X_b бензину у приміщенні від масової швидкості витоку W бензину для різних кратностей повітрообміну C для приміщення насосної станції для перекачування світлих нафтопродуктів з насосними агрегатами БНКЭ-9х1.

Згідно національного методу у приміщенні насосної станції для перекачування світлих нафтопродуктів може утворюватися ВЗ класу 2, яка виникає «рідко і триває недовго» без пояснень наскільки рідко та наскільки недовго.

7. Обговорення результатів визначення відповідності класифікації вибухонебезпечних зон різними методами

В Україні офіційно затвердженими є два методи встановлення класів та визначення параметрів ВЗ: міжнародний метод з використанням номограм ДСТУ EN ІЕС 60079-10-1 та національний метод НПАОП 40.1-1.32. Найсучаснішим (та більш складним) є міжнародний метод з використанням номограм. Причиною цього дуалізму є невідповідність національного та міжнародного (ІЕС) підходів до встановлення вимог вибухопожежної безпеки об'єктів, зокрема для обладнання у ВЗ.

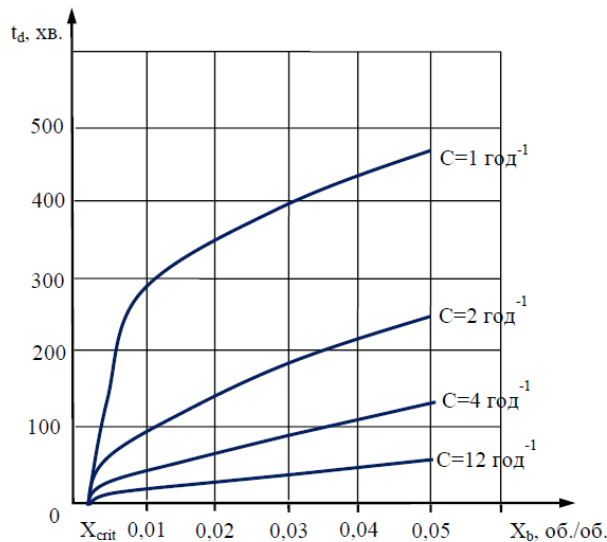


Рис. 3. Залежність часу існування t_d ВЗ від стаціонарної фонові концентрації X_b бензину при критичній концентрації $X_{crit} = 0,25 \cdot LFL$ для різних кратностей повітрообміну C для приміщення насосної станції для перекачування світлих нафтопродуктів з насосними агрегатами БНКЭ-9х1, розрахована міжнародним методом

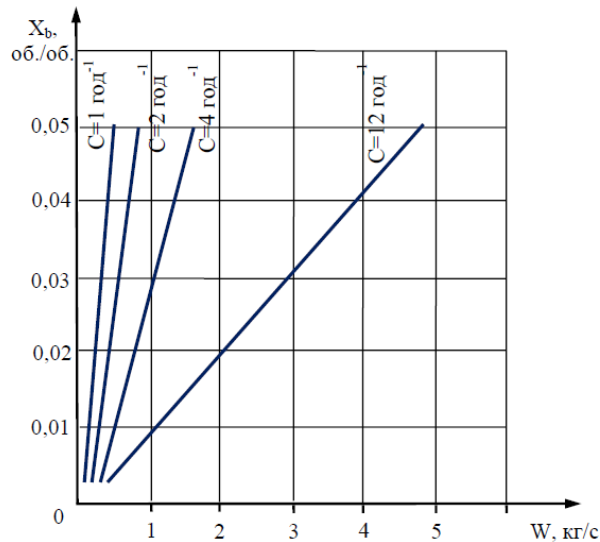


Рис. 4. Залежність стаціонарної фонові концентрації X_b бензину у приміщенні від масової швидкості витoku W бензину для різних кратностей повітрообміну C для приміщення насосної станції для перекачування світлих нафтопродуктів з насосними агрегатами БНКЭ-9х1, розрахована міжнародним методом

Згідно міжнародного методу газопароповіряні ВС можуть за певних обставин утворювати у приміщеннях ВЗ трьох класів: 0, 1, 2. Розмір ВЗ встановлюється за номограмою залежно від об'ємної характеристики витoku та властивостей

джерела витоку (важкий газ або пара, дифузний газ або пара або газовий (паровий) струмінь). Форма ВЗ встановлюється за відповідними рисунками.

Згідно національного методу газопароповіряні ВС можуть утворювати у приміщеннях ВЗ двох класів: 1 (створюється вкрай рідко) та 2. Клас і розмір ВЗ класу 2 у приміщенні залежать від розрахункового надлишкового тиску вибуху, що визначається галузевими нормами технологічного проектування для газо-, пароповітряного ВС. ВЗ класу 2 може займати весь об'єм приміщення або його частину в межах до 5 м по вертикалі і горизонталі від технологічного апарату, з якого можливий викид горючих газів або парів ЛЗР. Тривалість існування ВЗ не розраховується, а вважається «недовгою».

Для чисельної ілюстрації виявлених розбіжностей в розділах 5 та 6 досліджено умови встановлення та визначення розмірів ВЗ приміщень типових насосних станцій для перекачування світлих нафтопродуктів.

З рис. 1 видно, що у приміщенні насосної станції для перекачування світлих нафтопродуктів при проведенні розрахунків міжнародним методом може утворюватися або ВЗ класу 1, або ВЗ класу 2, або ВЗ не утворюється. Клас ВЗ залежить від масової швидкості витоку W бензину та швидкості вентиляції u_w у приміщенні. При високій масовій швидкості витоку W бензину та низькій швидкості вентиляції u_w утворюється ВЗ класу 1. При збільшенні швидкості вентиляції u_w та незмінності швидкості витоку W бензину ВЗ можливо віднести до класу 2. При подальшому збільшенні швидкості вентиляції умови для створення ВЗ відсутні. Наприклад, ВЗ слід віднести до класу 1 при масовій швидкості витоку W бензину $W = 5,2 \cdot 10^{-2}$ кг/с та швидкості вентиляції $u_w < 0,001$ м/с. При збільшенні швидкості вентиляції $u_w > 0,001$ м/с та незмінності швидкості витоку W бензину ($W = 5,2 \cdot 10^{-2}$ кг/с) ВЗ слід віднести до класу 2. При подальшому збільшенні швидкості вентиляції ($u_w > 0,3$ м/с при $W = 5,2 \cdot 10^{-2}$ кг/с) умови для створення ВЗ відсутні. Згідно національного методу НПАОП 40.1-1.32 у приміщенні насосної станції для перекачування світлих нафтопродуктів може утворюватися або ВЗ класу 2 або ВЗ відсутня.

У разі виникнення умовної аварії, критерієм якої обирається найбільш несприятливий варіант аварії, при якому у вибуху бере участь найбільша кількість речовин або матеріалів, найбільш небезпечних по наслідках вибуху при вихідних умовах, аналогічних приведеним по осі ординат на рис. 1, надлишковий тиск вибуху ΔP перебільшує 5 кПа. Тому має місце ВЗ класу 2.

При максимально припустимій кількості витоку на один насосний агрегат 0,26 г на 1 кг бензину, що перекачується, методом галузевих норм технологічного проектування ДСТУ Б В.1.1-36 розраховано, що швидкість випаровування бензину з підлоги перебільшує максимально припустиму швидкість витоку з одного насосного агрегату $W = 5,3 \cdot 10^{-3}$ кг/с при площі підлоги більше $F_{\text{підлога}} = 21,2 \text{ м}^2$ (для двох насосних агрегатів – у два рази більше відповідно). Тому увесь бензин, що витік, встигає повністю випаритися. Тому за методом галузевих норм технологічного проектування ДСТУ Б В.1.1-36 надлишковий тиск вибуху $\Delta P \leq 0,5$ кПа й ВЗ відсутня.

З рис. 2, отриманого міжнародним методом, видно, що у приміщенні насосної станції для перекачування світлих нафтопродуктів може утворюватися ВЗ класу 2 розміром $r > 1$ м при сумарній масовій швидкості витоку $W > 0,13$ кг/с, що відповідає витоку більше 6,32 г на 1 кг бензину, що перекачується. Відповідно $r = 5$ м при сумарній масовій швидкості витоку $W = 2,73$ кг/с, що відповідає витоку 132,81 г на 1 кг бензину, що перекачується, $r = 10$ м при сумарній масовій швидко-

сті витoku $W=0,13$ кг/с, що відповідає витoku 183,41 г на 1 кг бензину, що перекачується. Тобто ВЗ набуває значних розмірів тільки при значних аварійних витках. ВЗ займає усе приміщення тільки у випадку перевищення r його геометричних розмірів з урахування місця розташування насосного агрегату.

Згідно розрахунків, проведених національним методом із залученням методу галузевих норм технологічного проектування ДСТУ Б В.1.1-36, встановлено, що при максимально припустимій нормативній кількості витку на один насосний агрегат 0,26 г на 1 кг бензину, що перекачується, надлишковий тиск вибуху $\Delta P \leq 0,5$ кПа. Тому ВЗ відсутня й $r=0$.

З рис. 3 та рис. 4, отриманих міжнародним методом, видно, що час існування t_d ВЗ залежить від стаціонарної фонові концентрації X_b бензину (масової швидкості витку W бензину) за логарифмічним законом. Верхні межі залежностей обмежені верхньою концентраційною межею поширення полум'я для бензину UFL. Кратність повітрообміну у приміщенні суттєво впливає на час існування ВЗ t_d : збільшення C від 1 год⁻¹ до 12 год⁻¹ зменшує t_d у майже 11,7 раз при UFL та 11,8 раз при LFL. X_b досягає UFL при масовій швидкості витку бензину $W=0,405$ кг/с для $C=1$ год⁻¹, $W=0,800$ кг/с для $C=2$ год⁻¹, $W=1,617$ кг/с для $C=4$ год⁻¹ та $W=4,847$ кг/с для $C=12$ год⁻¹. Можна зробити висновок про суттєвий вплив кратності повітрообміну C у приміщенні на стаціонарну фонову концентрацію X_b та час існування t_d ВЗ.

Національним методом неможливо встановити частоту виникнення та тривалість існування ВЗ класу 2, зокрема у приміщенні насосної станції для перекачування світлих нафтопродуктів.

Таким чином, виявлено суттєві розбіжності при класифікації газопароповітряних вибухонебезпечних зон у приміщеннях при застосуванні міжнародного та національного методів розрахунку (метод з використанням номограм ДСТУ EN IEC 60079-10-1 та метод НПАОП 40.1-1.32 (якій додатково потребує розрахунків за національними галузевими нормами технологічного проектування ДСТУ Б В.1.1-36)). Виявлені розбіжності пояснюються суттєвою різницею фізичного та математичного апаратів міжнародного та національного методів розрахунку.

Критерієм правильності будь-яких теоретичних результатів є результати експериментальних досліджень, які на цьому етапі дослідження авторами не проводилися. Але такі дослідження проведено, їх результати порівняні з результатами розрахунку міжнародним методом й опубліковано, зокрема в роботах [6, 9, 11]. Перехід від міжнародного методу встановлення класу та розміру ВЗ на основі розрахунку величини гіпотетичного об'єму (перша редакція IEC 60079-10-1) до методу з використанням номограм (друга редакція IEC 60079-10-1) був обумовлений саме невідповідністю розрахованого та експериментально встановленого класу та розміру ВЗ. Тобто математичну модель остаточної редакції міжнародного методу можна вважати як найбільш наближену до результатів експериментальних досліджень.

Недоліком проведених досліджень слід вважати обмеження розрахунків конкретним прикладом вибухонебезпечного об'єкту (приміщення типових насосних станцій для перекачування світлих нафтопродуктів). Але отримані результати чітко висвітлюють виявлену невідповідність й шляхи її усунення. Процес Євроінтеграції не може бути обмеженим прийняттям пакету стандартів, які згідно національного законодавства не є обов'язковими до використання. Необхідний або повний перехід на європейські технологічні регламенти зі скасуванням національного методу розрахунку або вбудовування міжнародного методу розрахунку в наявні національні правила після їх комплексної технічної експертизи.

8. Висновки

1. Визначено відповідність умов встановлення класів вибухонебезпечних зон у приміщеннях міжнародним та національним методами розрахунку на прикладі приміщень насосних станцій для перекачування світлих нафтопродуктів при застосуванні різних методів розрахунку. При застосуванні міжнародного методу може утворюватися або вибухонебезпечна зона класу 1, або вибухонебезпечна зона класу 2, або вибухонебезпечна зона не утворюється. Клас вибухонебезпечної зони залежить від масової швидкості витоку бензину та швидкості вентиляції (при високій масовій швидкості витоку бензину та низькій швидкості вентиляції утворюється вибухонебезпечна зона класу 1; при збільшенні швидкості вентиляції та незмінності швидкості витоку бензину вибухонебезпечні зони або можливо віднести до класу 2 або умови для її створення відсутні). Національним методом у приміщенні може утворюватися або вибухонебезпечна зона класу 2, або вибухонебезпечна зона відсутня. Критерії утворення вибухонебезпечних зон національним методом суттєво відрізняються від критеріїв утворення вибухонебезпечних зон міжнародним методом. Тому результати розрахунків зіставляти важко.

2. Визначено відповідність параметрів вибухонебезпечних зон при використанні міжнародного та національного методів розрахунку на прикладі приміщень насосних станцій для перекачування світлих нафтопродуктів залежно від технологічних режимів їх роботи. Міжнародним методом у приміщенні може утворюватися вибухонебезпечна зона класу 2 розміром більше 1 м при сумарній масовій швидкості витоку більше 0,13 кг/с, що відповідає витоку більше 6,32 г на 1 кг бензину, що перекачується. Відповідно вибухонебезпечна зона має місце на відстані 5 м при сумарній масовій швидкості витоку 2,73 кг/с, що відповідає витоку 132,81 г на 1 кг бензину, що перекачується. Тобто вибухонебезпечна зона набуває значних розмірів тільки при значних аварійних витоках. Вибухонебезпечна зона займає усе приміщення тільки у випадку рівності або перевищення розрахованого розміру вибухонебезпечної зони геометричних розмірів приміщення з урахування місця викиду небезпечної речовини. Враховуючі, що критерії утворення вибухонебезпечних зон національним та міжнародним методами відрізняються, результати розрахунків важко зіставляти. Час існування вибухонебезпечної зони, отриманий міжнародним методом, залежить від стаціонарної фонові концентрації бензину (масової швидкості витоку) за логарифмічним законом. Кратність повітрообміну у приміщенні суттєво впливає на час існування вибухонебезпечної зони (збільшення кратності повітрообміну від 1 год⁻¹ до 12 год⁻¹ зменшує час існування вибухонебезпечної зони у майже 11,7 раз при концентрації біля UFL та 11,8 раз при концентрації біля LFL), з чого можна зробити висновок про суттєвий вплив кратності повітрообміну у приміщенні на стаціонарну фонову концентрацію та час існування вибухонебезпечної зони. При застосуванні національного методу неможливо встановити тривалість існування вибухонебезпечної зони класу 2, зокрема у приміщенні насосної станції для перекачування світлих нафтопродуктів.

Таким чином, виявлені суттєві розбіжності класифікації газопароповітряних вибухонебезпечних зон у приміщеннях при застосуванні міжнародного та національних методів розрахунку. Для їх усунення необхідний або повний перехід на європейські технологічні регламенти з відміною наявних національних напрацювань та відповідною зміною ментальності проектувальника, або вбудовуванням усталених міжнародних норм в наявні національні правила після їх комплексної технічної експертизи.

Література

1. International Electrotechnical Commission (IEC). HIS Markit Standards Store. URL: <http://www.iec.ch>
2. National Fire Protection Association (NFPA). URL: <https://www.nfpa.org/>
3. British Standards Institution (BSI). URL: <https://www.bsigroup.com/>
4. Canadian Standards Association (CSA). URL: <https://www.scc.ca/>
5. Bozek A. Application of IEC 60079-10-1 edition 2.0 for Hazardous Area Classification. IEEE Transactions on Industry Applications. 2018. Vol. 54. P. 1881–1889. doi: 10.1109/TIA.2017.2785258
6. Bozek A., Driscoll T., Miller J., Rowe V., Lawrence W. The Use of Combustible Gas Detection In Hazardous Locations: Additional Safety Precautions Around Flammable Gas Or Vapors. IEEE Industry Applications Magazine. 2018. Vol. 24. P. 64–74. doi: 10.1109/MIAS.2017.2740455
7. Cole M., Lawrence W., Adams D., Driscoll T. The Canadian electrical code for hazardous locations has no class – But it does have significant changes. IEEE Transactions on Industry Applications. 2017. Vol. 53. P. 1635–1645. doi: 10.1109/TIA.2016.2622683
8. Souza A., Luiz A., Neto A., Araujo A., Silva H., Silva S., Alves J. A new correlation for hazardous area classification based on experiments and CFD predictions. Process Safety Progress. 2019. Vol. 38. № 1. P. 21–26. doi: 10.1002/prs.11974
9. Alves J., Neto A., Araújo A., Silva H., Silva S., Claudemi A., Nascimento C., Luiz A. Overview and experimental verification of models to classify hazardous areas. Process Safety and Environmental Protection. 2019. Vol. 122. P. 102–117. doi: 10.1016/j.psep.2018.11.021
10. Nascimento C., Luiz A., Barros P., Neto A., Alves J. A CFD-based empirical model for hazardous area extent prediction including wind effects. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2021. Vol. 71. 104497. doi: 10.1016/j.jlp.2021.104497
11. Кулаков О. В., Катунін А. М., Михайловська Ю. В. Дослідження класів і розмірів вибухонебезпечних зон резервуарів зі світлими нафтопродуктами. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2022. № 1(35). С. 133–146. doi: 10.52363/2524-0226-2022-35-10

*O. Kulakov, PhD, Associate Professor, Senior Researcher of the Department
Yu. Mykhailovska, PhD, Senior Researcher of the Department*

A. Katunin, PhD, Senior Researcher, Associate Professor of the Department

*O. Roianov, PhD, Associate Professor, Senior Lecturer of the Department
National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine*

DETERMINATION OF CONFORMITY OF INTERNATIONAL AND NATIONAL METHODS OF CLASSIFICATION OF GASVAPORAIR EXPLOSIVE ZONES

Discrepancies between the international and national methods of classification of gas-vapor-air explosive zones (the method of the final edition of DSTU EN IEC 60079-10-1 and the method of NPAOP 40.1-1.32) were revealed using the example of the premises of pumping stations for pumping light petroleum products. When applying the international method, either an explosive zone of class 1 or an explosive zone of class 2 can be formed, or an explosive zone is not formed. The class of the zone depends on the mass rate of gasoline leakage and the ventilation rate (with a high mass rate of gasoline leakage and a low ventilation rate, a class 1 zone is formed; with an increase in the ventilation rate and the constant rate of gasoline leakage, either a class 2 zone is created or the conditions for its creation are absent). The explosive zone of class 2 acquires significant dimensions only in case of significant emergency leaks (in particular, it occurs at a distance of 5 m with a total mass leakage rate of 132,81 g per 1 kg of gasoline

pumped). The explosive zone occupies the entire room only if its size exceeds the geometric dimensions of the room, taking into account the place of release of the hazardous substance. The time of existence of the explosive zone depends on the stationary background concentration of gasoline according to the logarithmic law. The frequency of air exchange in the room significantly affects the time of existence of the explosive zone. When applying the national method in the room, either an explosive zone of class 2 or no explosive zone can be formed. The criteria for the formation of an explosive zone by different methods differ significantly. The elimination of identified discrepancies is possible either by a complete transition to European technological regulations with the cancellation of the national method of calculation or by incorporating the international method of calculation into the existing national rules after their comprehensive technical examination.

Keywords: explosive zone, explosive environment, pump station, nomogram, room, light oil products

References

1. International Electrotechnical Commission (IEC). HIS Markit Standards Store. Available at: <http://www.iec.ch>
2. National Fire Protection Association (NFPA). Available at: <https://www.nfpa.org/>
3. British Standards Institution (BSI). Available at: <https://www.bsigroup.com/>
4. Canadian Standards Association (CSA). Available at: <https://www.scc.ca/>
5. Bozek, A. (2018). Application of IEC 60079-10-1 edition 2.0 for Hazardous Area Classification. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54, 1881–1889. doi: 10.1109/TIA.2017.2785258
6. Bozek, A., Driscoll, T., Miller, J., Rowe, V., Lawrence, W. (2018). The Use of Combustible Gas Detection In Hazardous Locations: Additional Safety Precautions Around Flammable Gas Or Vapors. *IEEE Industry Applications Magazine*, 24, 64–74. doi: 10.1109/MIAS.2017.2740455
7. Cole, M., Lawrence, W., Adams, D., Driscoll, T. (2017). The Canadian electrical code for hazardous locations has no class – But it does have significant changes. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53, 1635–1645. doi: 10.1109/TIA.2016.2622683
8. Souza, A., Luiz, A., Neto, A., Araujo, A., Silva, H., Silva, S., Alves, J. (2019). A new correlation for hazardous area classification based on experiments and CFD predictions. *Process Safety Progress*, 38(1), 21–26. doi: 10.1002/prs.11974
9. Alves, J., Neto, A., Araújo, A., Silva, H., Silva, S., Claudemi, A., Nascimento, C., Luiz, A. (2019). Overview and experimental verification of models to classify hazardous areas. *Process Safety and Environmental Protection*, 122, 102–117. doi: 10.1016/j.psep.2018.11.021
10. Nascimento, C., Luiz, A., Barros, P., Neto, A., Alves, J. (2021). A CFD-based empirical model for hazardous area extent prediction including wind effects. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 71, 104497. doi: 10.1016/j.jlp.2021.104497
11. Kulakov, O. V., Katunin, A. M., Mykhailovska, Yu. V. (2022). Doslidzhennia klasiv i rozmiriv vybukhonebezpechnykh zon rezervuariv zi svitlymy naftoproduktamy. *Problemy nadzvychainykh sytuatsii*, 1(35), 133–146. doi: 10.52363/2524-0226-2022-35-10

Надійшла до редколегії: 03.03.2023

Прийнята до друку: 18.04.2023