

УДК 614.8

Ю. П. Ключка¹, д.т.н., с.н.с., проф. каф. (ORCID 0000-0003-1066-4217)

Д. О. Дорошенко², пров. фах. відділу (ORCID 0000-0003-4222-9359)

Р. В. Корнієнко², к.т.н., с.д., пров. н.с. відділу (ORCID 0000-0003-4854-283X)

¹*Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова,
Харків, Україна*

²*Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна*

ДОСЛІДЖЕННЯ ЧАСУ ДОСЯГНЕННЯ ПОЖЕЖОВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ КОНЦЕНТРАЦІЙ В ПРИМІЩЕННІ ПРИ ВИТОКУ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

В роботі проведено моделювання процесу витоку та накопичення природного газу в приміщенні. Показано, що у всьому діапазоні можливих значень тиску відбувається докритичне витікання газу. Встановлена залежність масового розходу та часу досягнення пожежовибухонебезпечної концентрації газу в приміщенні. Досліджено стохастичний характер часу досягнення нижньої концентраційної межі поширення полум'я природного газу (метану) при його витоку в закритому приміщенні. Оскільки час залежить від багатьох випадкових факторів, таких як масова витрата газу, що визначається тиском та площею отвору витоку, було проведено математичне моделювання процесу накопичення газу для трьох сценаріїв розподілу площі отвору. Для отриманих трьох вибірок значень часу проведено детальний статистичний аналіз. Розраховані базові показники (середнє, медіана, стандартне відхилення, коефіцієнт асиметрії) та виявлено високу правосторонню асиметрію для всіх вибірок, що свідчить про їх невідповідність нормальному закону. Перевірка гіпотез про відповідність розподілам (нормальному, гамма) за критеріями Шапіро-Вілка та Колмогорова-Смірнова дала негативний результат. Навіть гіпотеза про логнормальний розподіл, що часто використовується для подібних процесів, була відхилена формальними тестами за тими ж критеріями. Візуальний аналіз за допомогою «Q-Q plot» підтвердив результати тестів: для логарифмованих значень часу всі три вибірки показали чітку S-подібну криву, характерну для лептокуртичних розподілів з «важкими хвостами». Це вказує на те, що стандартні моделі, включаючи логнормальну, систематично недооцінюють ймовірність як аномально малих, так і аномально великих значень часу досягнення НКМП. Отримані результати показують на важливості врахування «важких хвостів» при оцінці ризиків та розробці превентивних заходів безпеки.

Ключові слова: метан, витікання, вибірка, логнормальний закон, масова витрата

1. Вступ

Природний газ, основу якого складає метан, є одним з ключових енергоносіїв у сучасному світі, забезпечуючи значну частину потреб комунального господарства та промисловості. Його широке застосування зумовлене високою енергоефективністю та відносною доступністю. Проте, метан є легкозаймистою та вибухонебезпечною речовиною. При витоку в закритому приміщенні він швидко накопичується, створюючи вибухонебезпечні зони [1, 2].

В умовах військової агресії РФ проблема техногенної безпеки, пов'язаної з газом, набуває особливої гостроти. Регулярні пошкодження газорозподільної інфраструктури (магістральних та внутрішньобудинкових мереж) внаслідок бойових дій призводять до неконтрольованих витоків [3, 4]. Це створює критичні ризики для цивільного населення, адже накопичення газу в житлових будинках чи підвалах може призвести до руйнівних вибухів навіть від найменшого джерела запалювання.

Ключовим фактором, що визначає рівень небезпеки, є не лише факт витоку, а й час, за який концентрація газу в приміщенні досягає нижньої концентраційної межі поширення полум'я (НКМП). Цей проміжок часу є критичним параметром

для оцінки ризику: він визначає, чи встигнуть спрацювати системи аварійної вентиляції, чи спрацюють датчики загазованості, і чи матимуть люди час для безпечної евакуації [4].

Проте, цей час не є сталою величиною. Він залежить від комплексу факторів, що часто мають стохастичний (випадковий) характер, зокрема: масова витрата газу, точного об'єму та геометрії приміщення тощо [5].

Таким чином проблема мінімізації ризиків та можливості утворення пожежовибухонебезпечних концентрацій природного газу в приміщенні є актуальною.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В [5] наводиться аналіз процесу накопичення горючих парів пропан-бутану в приміщенні внаслідок розгерметизації балону. Основна мета дослідження – моделювання та кількісна оцінка часу, необхідного для досягнення пожежовибухонебезпечних концентрацій, зокрема нижньої концентраційної межі поширення полум'я (НКМП), у заданому об'ємі. Дослідження, враховує ключові фактори, що впливають на швидкість витоку, такі як тиск (що залежить від температури), характеристики отвору розгерметизації. Робота має на меті надати інструмент для оцінки ризиків вибуху при зберіганні та експлуатації газових балонів у побутових та комерційних приміщеннях, однак не розглядаються ситуації з природним газом.

В роботі [6] представлено результати фізичних експериментів та CFD-моделювання для валідації процесу розповсюдження метану в житлових приміщеннях. Робота підтверджує ключові фізичні закономірності накопичення газу, які є основою для будь-якого моделювання, включаючи наше. Але в цій статті не досліджується стохастичний характер часу досягнення НКМП, а процес розглядається переважно детерміністично.

В [7] автори моделюють витік метану на кухні та розраховують розподіл концентрації в часі, безпосередньо визначаючи час, необхідний для досягнення нижньої межі займистості. Ця робота є прикладом класичного CFD-підходу до визначення часу небезпеки. Але в цій статті не аналізується статистичний розподіл цього часу, розглядаючи його як детерміновану величину для заданих умов.

Дослідження в роботі [8] показують динаміку розповсюдження метану в закритих просторах, акцентуючи увагу на ризику вибуху при формуванні вибухонебезпечної хмари (в діапазоні 4,4 %–15 %). Це підтверджує важливість НКМП як критичного порогу. Але в цій статті не проводиться імовірнісний аналіз часу, необхідного для досягнення цього порогу, та не досліджується закон розподілу цієї величини.

В роботі [9] автори використовують імовірнісні концепції для оцінки ризиків газових вибухів у приміщеннях, враховуючи невизначеності. Вона підтверджує актуальність застосування стохастичних методів. Але в цій статті імовірнісна модель застосовується для оцінки навантажень від вибуху (тиску), а не для часу накопичення газу до вибухонебезпечної концентрації.

В роботі [10] розглядається застосування методів CFD для прогнозування розміру та розташування хмар горючого газу. Це демонструє стандартний інструментарій для моделювання просторового розповсюдження газу. Але в цій статті не враховується випадковий характер параметрів витоку і, як наслідок, не досліджується статистика часу формування небезпечної хмари.

В роботі [11] надаються аналітичні моделі для розрахунку концентрації газу в приміщенні з урахуванням вентиляції, зокрема під стелею. Вона закладає осно-

ву для спрощених (не-CFD) моделей накопичення. Розглянуто дві небезпеки: токсична (поступове накопичення) та вибухонебезпечна. Автори виводять диференціальні рівняння, які описують баланс маси газу в приміщенні. Вони встановлюють чітку залежність між: Q (швидкість витoku газу); V (об'єм приміщення) та N (кратність повітрообміну, тобто вентиляція). Надано проєктні рішення: Результатом роботи є графіки, які дозволяють інженеру, знаючи параметри приміщення та потенційного витoku, визначити концентрацію газу з часом або необхідну кратність повітрообміну, щоб ніколи не досягти НКМП.

Робота [12] демонструє комплексний підхід до управління ризиками (risk management), пов'язаними з витком газу. Вона не стільки моделює саму фізику витoku, скільки інтегрує програмні інструменти для оцінки наслідків у загальну методологію безпеки. Автори використовують ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres), яка швидко моделює, як розповсюджується небезпечна хмара, показуючи на карті зони, де буде досягнуто НКМП, токсичні рівні тощо. Це модель наслідків для конкретного сценарію. Також автори використовують візуальний метод аналізу ризиків. Він пов'язує причини небезпечної події (наприклад, витік газу, корозія труби) з її наслідками (наприклад, вибух, пожежа). Між ними розміщуються заходи безпеки. Стаття поєднує ці два методи: ALOHA визначає, наскільки серйозними є наслідки (наприклад, радіус вибухонебезпечної зони), а "Метелик" допомагає зрозуміти, як цьому запобігти. Ця робота показує практичне застосування аналізу ризиків витoku газу в інженерії безпеки, однак не дає відповіді щодо часу формування небезпечних концентрацій.

В [13] наводиться офіційний звіт про розслідування реальної промислової катастрофи (вибуху на підприємстві ASCO). Такі звіти є надзвичайно цінними джерелами, оскільки вони детально, крок за кроком, відновлюють події, що призвели до інциденту. Документ аналізує фактичні докази (показання свідків, пошкодження обладнання, записи), щоб встановити першопричину та послідовність подій. Звіт чітко встановлює, що причиною вибуху стало накопичення горючого газу (в даному випадку, ацетилену) у недостатньо вентильованому приміщенні. Звіт підкреслює, що нездатність вчасно виявити або запобігти накопиченню газу до НКМП призводить до катастроф, однак також однак не дає відповіді щодо часу формування небезпечних концентрацій.

В роботі [14] продемонстровано та валідовано використання комерційного програмного пакету ANSYS Fluent для моделювання фізики процесу витoku та розповсюдження природного газу. Автори створюють 3D-геометрію приміщення та задають фізичні моделі. Далі запускають чисельний розрахунок для конкретного детермінованого сценарію. В результаті отримують детальні 3D-карти, що показують, як концентрація метану змінюється в просторі та в часі. Це дозволяє побачити формування газової "хмари" біля стелі. Робота показує один розрахунок для одного набору вхідних даних. Вона не ставить за мету дослідити, що станеться, якщо вхідні параметри (тиск, площа отвору) будуть змінюватися.

Мета [15] надати інженерам, екологам та будівельникам чіткі інструкції та довідкову інформацію для роботи з метаном (наприклад, при забудові територій біля старих звалищ). Документ збирає в одному місці всю ключову інформацію про метан та пропонує спрощені моделі та підходи для оцінки ризиків та проєктування систем вентиляції чи моніторингу. Але в цьому документі представлені усталені, спрощені інженерні підходи. Методики, наведені в ньому, базуються на детерміністичних розрахунках з коефіцієнтами запасу. Цей документ є ілюстрацією стандартної практики.

У результаті аналізу літератури встановлено, що на сьогодні відсутні оцінки щодо інтенсивності та часу до утворення пожежовибухонебезпечних концентрацій в приміщенні, враховуючи стохастичний характер вхідних параметрів. Таким чином, проблема дослідження досягнення пожежовибухонебезпечних концентрацій при різних сценаріях витoku є актуальною і становить ту невирішену частину проблеми, яка вирішується у даній статті.

Таким чином невирішеною частиною проблеми є моделювання часу досягнення вибухонебезпечних концентрацій з урахуванням випадкових процесів під час його витікання.

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є дослідження часу досягнення нижньої концентраційної межі поширення полум'я природного газу в замкненому приміщенні при моделюванні витоків з різними параметрами, а також оцінка адекватності стандартних ймовірнісних моделей для опису цього процесу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- виконати моделювання процесу накопичення концентрації газу та розрахувати час досягнення нижньої концентраційної межі поширення полум'я для приміщення;
- виконати стохастичне моделювання часу досягнення пожежовибухонебезпечних концентрацій шляхом генерації репрезентативних вибірок значень часу та провести їх статистичний аналіз, розрахувавши основні показники (середнє, медіану, стандартне відхилення, коефіцієнт асиметрії), а також перевірити гіпотези на відповідність вибірок законам розподілу.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є процес витoku природного газу (метану) та подальшого накопичення його концентрації до нижньої концентраційної межі поширення полум'я (НКМП) у замкненому об'ємі приміщення.

Предметом дослідження є статистичні характеристики випадкової величини – часу досягнення НКМП. Це включає аналіз форми розподілу цієї величини, розрахунок її основних параметрів (середнє, медіана, асиметрія) та перевірку відповідності теоретичним розподілам.

Гіпотезою дослідження є припущення, що розподіл часу досягнення НКМП суттєво відрізняється від нормального закону та має ознаки лептокуртозу «важких хвостів». Це зумовлено стохастичним характером ключових параметрів витoku, що призводить до вищої ймовірності екстремальних (дуже малих або дуже великих) значень часу ніж передбачають стандартні моделі.

Для дослідження стохастичного характеру часу досягнення НКМП застосовується комплекс дослідницьких методів:

- методи математичного моделювання для кількісного опису фізичних процесів витoku газу та зміни його концентрації в приміщенні;
- методи математичної статистики застосовуються для аналізу отриманих вибірок часу.

5. Моделювання масової витрати газу при його витіканні в приміщення

Однією з пожежовибухонебезпечних ситуацій є повільне витікання газу в результаті виникнення тріщин, свищів, наскрізних отворів, виходу з ладу запірних

пристроїв, тощо. Відповідно до [16], масова витрата стиснутого газу описується такими виразами:

- докритичне витікання газу

$$Q = S \cdot \mu \left(P \cdot \rho \cdot k \left(\frac{2k}{k-1} \right) \left(\frac{P_a}{P} \right)^{\frac{2}{k}} \left[1 - \left(\frac{P_a}{P} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \right)^{0,5}, \text{ при } \frac{P_a}{P} \geq \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (1)$$

- надкритичне витікання газу

$$Q = S \cdot \mu \left(P \cdot \rho \cdot k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \right)^{0,5}, \text{ при } \frac{P_a}{P} < \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (2)$$

де Q – масова витрата, $\text{кг} \cdot \text{с}^{-1}$; P – тиск газу, Па; P_a – атмосферний тиск, Па; k – показник адіабати газу; S – площа отвору, м^2 ; μ – коефіцієнт витікання газу; ρ – щільність газу, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$.

Коефіцієнт адіабати для метану, як і для інших реальних газів, не є сталою величиною. Він залежить від температури та тиску. Аналіз залежності

$\frac{P_a}{P} \geq \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}$ щодо характеру витікання газу показав, що вона виконується на всьому діапазоні значень тиску в системі.

На рис. 1 наведено залежності $\frac{P_a}{P}$ та $\left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}$ від тиску в системі.

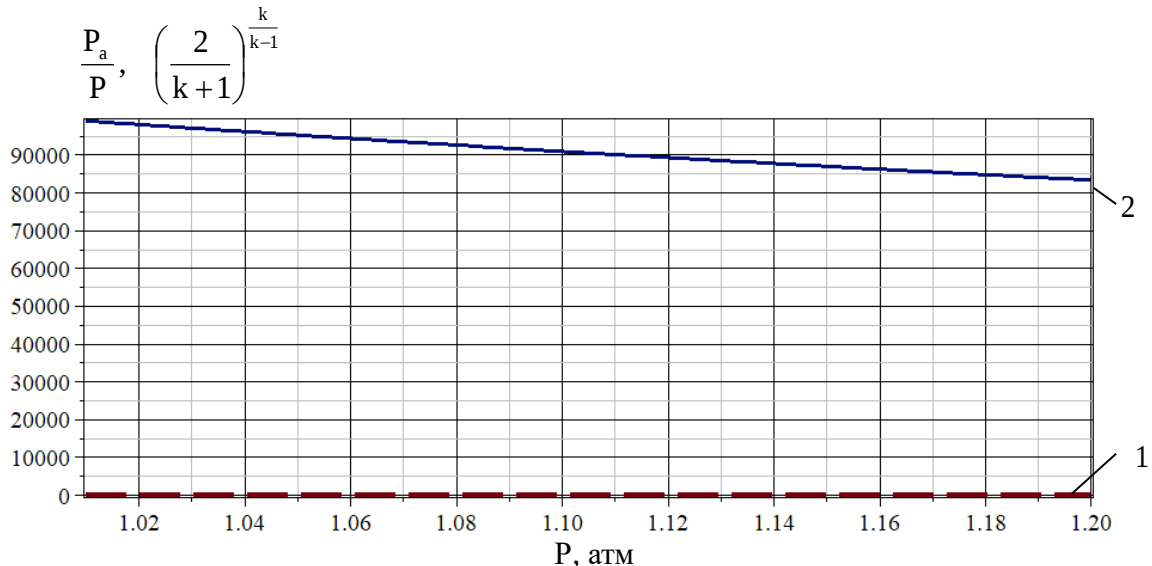


Рис. 1. Залежність $\frac{P_a}{P}$ – (1) та $\left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}$ – (2) від тиску в системі

Враховуючи, що газ у нас знаходиться при невисоких температурах та майже атмосферному тиску, можна прийняти, що $k=1,31$. Тоді вираз (1) можна представити у вигляді

$$Q = 0,0008909 \cdot S \cdot \left(P \left(\frac{1}{P} \right)^{1,526} \left[1 - \left(\frac{1}{P} \right)^{0,236} \right] \right)^{0,5} . \quad (3)$$

На рис. 2 наведено залежність масової витрати газу з системи від площі отвору та тиску. Графік побудований за умови, що $\mu=1$, а $\rho = 0,717 \text{ кг/м}^3$.

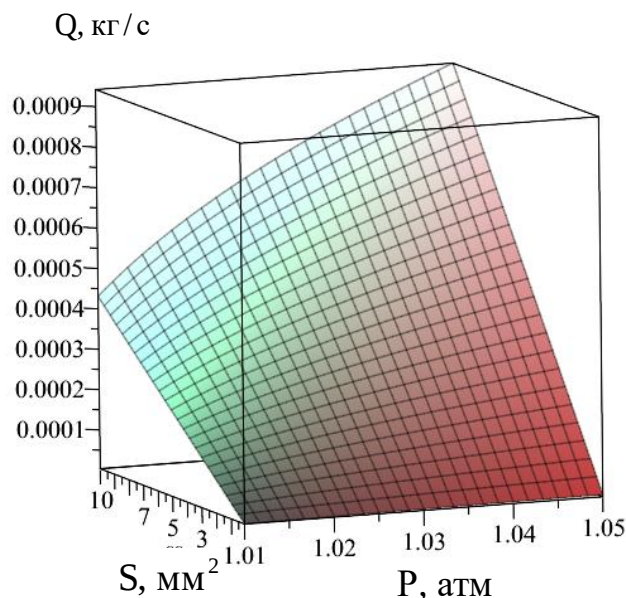


Рис. 2. Залежність масової витрати газу з системи від площі отвору та тиску

Аналіз рисунку показує, що при отвору площею 1 мм^2 витрата газу складає від $0,00005$ до $0,0001 \text{ кг/с}$. У той же час при площі $0,1 \text{ мм}^2$ витрата газу зменшується ще в 10 разів.

Таким чином, при малих величинах площі витікання газу буде незначним і власник житла може не помічати його через незначні витрати.

6. Стохастичне моделювання часу досягнення пожежовибухонебезпечних концентрацій

У зв'язку з тим, що ми не можемо впевнено стверджувати про параметри витікання, проведемо моделювання системи, коли потенційна площа отвору та тиск в системі змінюється випадковим чином.

На рис. 3 – рис. 5 наведені гістограми частот масової витрати газу за умови, що тиск в системі розглядається як випадкова величина за рівномірним законом розподілу. В той же час на рис. 3 випадкова величина площі отвору розглядається за рівномірним законом (варіант № 1), на рис. 4 – логарифмічним (варіант № 2), на рис. 5 – експоненційним (варіант № 3). Величина площі отвору варіювалася в діапазоні $[0,1 \dots 10 \text{ мм}^2]$, а тиску $[1,01 \dots 1,05 \text{ атм.}]$.

На рис. 6 відповідно до проведених досліджень наведено отримані величини масової витрати газу в порядку зростання отриманих величин для трьох варіантів. Також наведені залежності часу до виникнення пожежовибухонебезпечної ситуації φ_n для метану у приміщенні об'ємом 36 м^3 ($3 \times 4 \times 3 \text{ м}$).

Аналіз рисунку показує, що характер зміни площі отвору може змінювати потенційний час досягнення пожежовибухонебезпечної концентрації в кілька разів, відповідно й імовірність такої події.

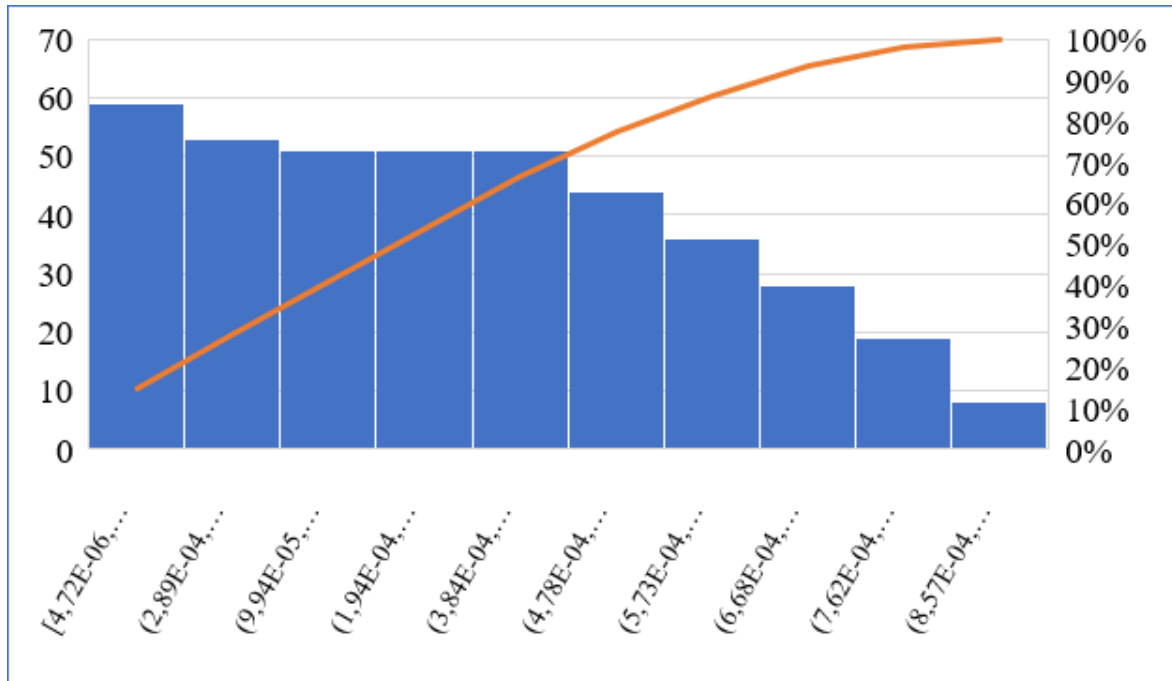


Рис. 3. Розподіл частот масової витрати газу та діаграма Парето (варіант 1)

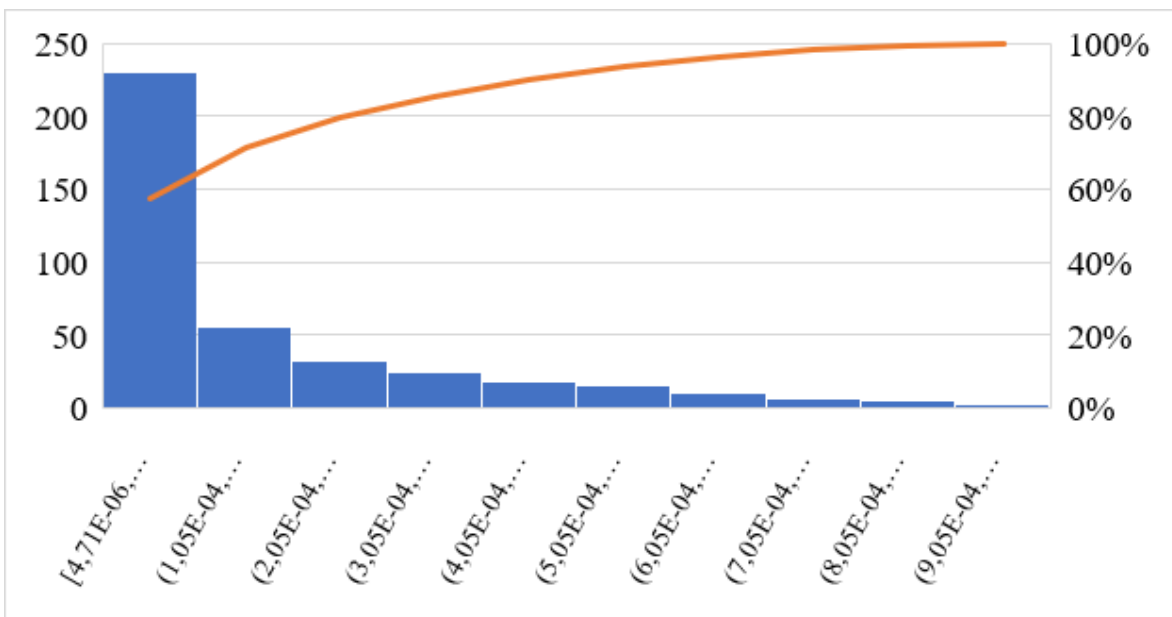


Рис. 4. Розподіл частот масової витрати газу та діаграма Парето (варіант 2)

В табл. 1. приведені характеристики трьох вибірок (варіант 1, 2, 3)

Табл. 1. Характеристика вибірок (варіант 1, 2, 3)

	Середнє (X)	Медіана (X)	Ст. відхилення (X)	Асиметрія (X)	Середнє $Y=\ln(X)$	Ст. відхилення $Y=\ln(X)$	Асиметрія $Y=\ln(X)$
Вибірка 1 (варіант 1)	5,060	1,401	13,717	5,160	0,646	1,072	1,629
Вибірка 2 (варіант 2)	3,394	0,921	12,897	6,088	0,144	0,885	3,283
Вибірка 3 (варіант 3)	16,314	6,870	20,443	1,730	1,933	1,417	0,002

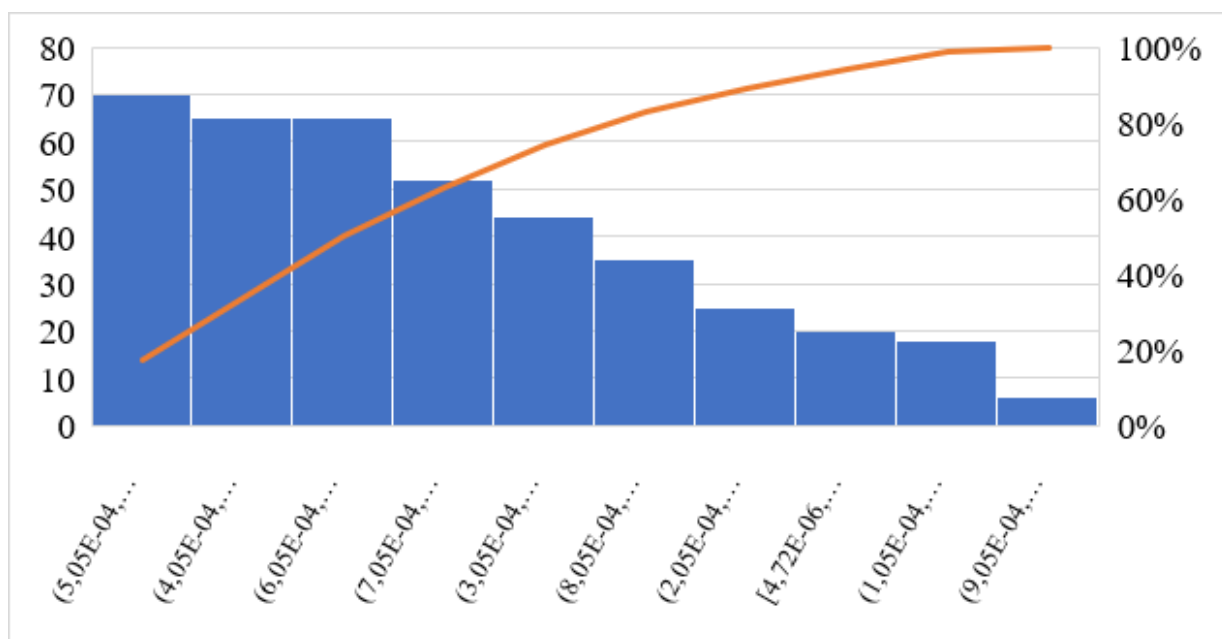


Рис. 5. Розподіл частот масової витрати газу та діаграма Парето (варіант 3)

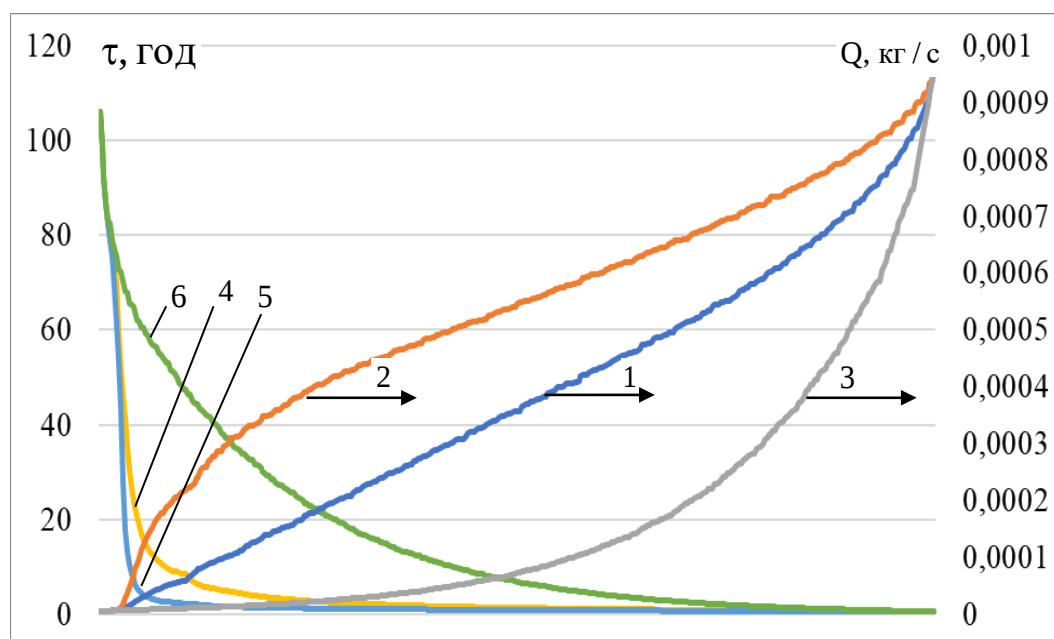


Рис. 6. Залежність масової витрати газу та часу досягнення φ_n в приміщенні від площі отвору та тиску: 1, 4 – варіант 1; 2, 5 – варіант 2; 3, 6 – варіант 3

На основі даних з табл. 1 були висунуті гіпотези про розподіл випадкових величин нормальним законом, гамма розподілом. Перевірка за критеріями Шапіро-Вілка та Колмогорова спростували ці гіпотези. Висунута гіпотеза про розподіл випадкових величин за логнормальним законом теж не пройшла перевірку за критеріями Шапіро-Вілка та Колмогорова.

Перевірка трьох вибірок на логнормальність з використанням Q-Q Plot (Quantile-Quantile Plot) показало, що логарифмовані дані не відповідають ідеальному логнормальному розподілу (рис. 6, по горизонтальній осі відкладено теоретичні квантилі (Z-scores) розподілу, а по вертикальній – фактичні квантилі, відсортовані логарифмовані значення).

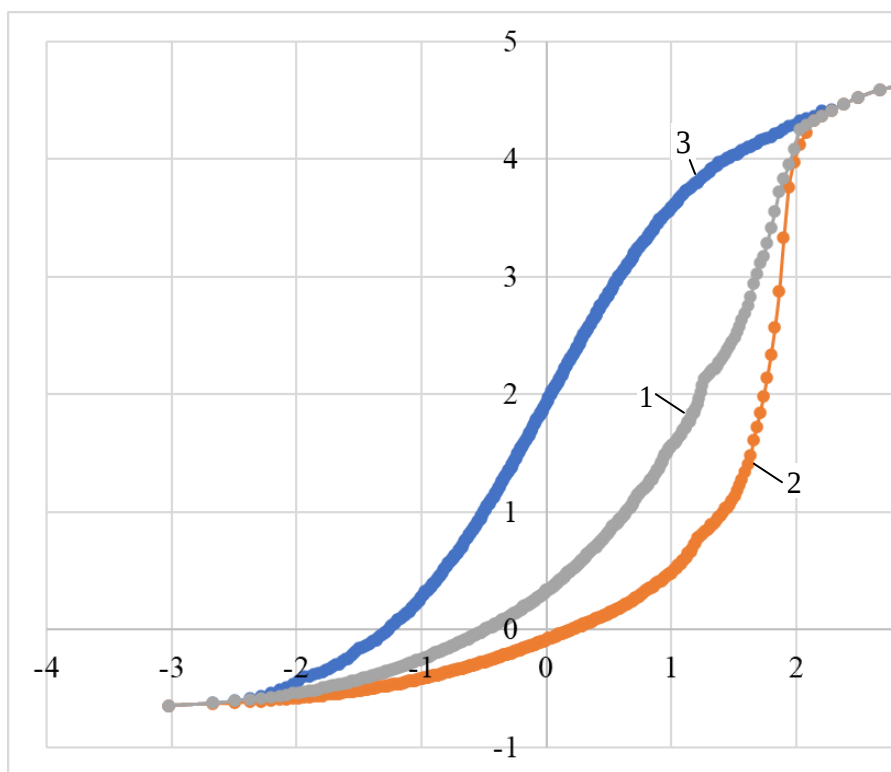


Рис. 7. Порівняльний Q-Q plot для перевірки на нормальність логарифмованих даних: 1 – Вибірка 1; 2 – Вибірка 2; 3 – Вибірка 3

Аналіз рисунку показує, що замість очікуваної прямої діагональної лінії, яка б свідчила про повну відповідність, усі три набори даних продемонстрували чітку та послідовну "S-подібну" криву. Ця форма є ознакою лептокуртичного розподілу, тобто наявності так званих "важких хвостів". Графічно це проявилось у тому, що фактичні квантілі на краях розподілу (як у зоні найменших, так і в зоні найбільших значень) систематично відхилялися від теоретичних нормальних значень. Таким чином, візуальний аналіз Q-Q plot повністю підтвердив результати формальних тестів (Шاپіро-Вілка та Колмогорова), які відхилили нульову гіпотезу про нормальність логарифмованих даних. Це свідчить про те, що стандартний логнормальний розподіл, хоча і є корисним наближенням, систематично недооцінює ймовірність виникнення екстремальних значень в досліджуваних процесах.

7. Обговорення результатів дослідження оцінки часу формування пожежовибухонебезпечних концентрацій

Отримані результати статистичного аналізу трьох вибірок часу досягнення НКМП чітко вказують на стохастичний та нелінійний характер цього процесу. Аналіз чисельних показників, наведених у Таблиці 1, демонструє надзвичайно високі значення коефіцієнтів асиметрії для вихідних даних (від 1,73 до 6,09), що підтверджує невідповідність розподілу симетричному нормальному закону. Хоча логарифмічне перетворення даних значно зменшило асиметрію для Вибірки 3 (до 0,002), для Вибірок 1 та 2 вона залишилася помітною (1,629 та 3,283 відповідно).

Ключовим результатом дослідження, що візуально підтверджується даними з рис. 7, є невідповідність логарифмованих даних ідеальному нормальному розподілу. Чітка S-подібна крива на Q-Q графіках для всіх трьох вибірок є прямим свідченням лептокуртозу, тобто наявності так званих «важких хвостів». Практичне

значення цього висновку полягає в тому, що реальний процес генерує більше екстремальних значень (як аномально малих, так і аномально великих часів), ніж передбачає стандартний логнормальний розподіл.

Мета роботи вирішувалась шляхом поєднання детермінованої моделі масової витрати газу з імовірнісним підходом до визначення вхідних параметрів витoku (тиску та площі отвору). Замість розрахунку єдиного детермінованого значення часу, цей підхід дозволив згенерувати репрезентативні вибірки та провести їх глибокий статистичний аналіз, що й дало змогу виявити неадекватність стандартних моделей розподілу.

Перевагою запропонованого підходу є можливість кількісної оцінки усього спектру можливих значень часу, а не лише середнього чи найбільш імовірного сценарію. Це дає змогу оцінити ймовірність екстремальних, найбільш небезпечних подій (дуже швидкого досягнення НКМП), які ігноруються класичними детерміністичними підходами та недооцінюються стандартними логнормальними моделями.

Недоліками та обмеженнями даної роботи є низка припущень. По-перше, моделювання проводилося для приміщення фіксованого об'єму (36 м^3) та не враховувало впливу вентиляції, яка б суттєво змінила час накопичення. По-друге, було зроблено припущення про миттєве та рівномірне перемішування газу в об'ємі, що є ідеалізацією, оскільки метан легший за повітря. По-третє, для параметрів витoku використовувалися прості теоретичні розподіли (рівномірний, логарифмічний, експоненційний), тоді як реальні розподіли цих параметрів (наприклад, внаслідок пошкоджень) можуть бути складнішими.

Розвиток даного дослідження може полягати у використанні більш складних ймовірнісних моделей для опису параметрів витoku та верифікації отриманих статистичних моделей за допомогою експериментальних досліджень.

8. Висновки

1. Обґрунтовано підхід до моделювання, який поєднує детерміністичну модель масової витрати газу зі стохастичним (випадковим) характером вхідних параметрів. З огляду на те, що параметри витoku (зокрема, площа отвору) не можуть бути визначені напевно, у роботі було змодельовано три сценарії розподілу площі отвору: рівномірний (варіант 1), логарифмічний (варіант 2) та експоненційний (варіант 3). Виконано стохастичне моделювання процесу накопичення природного газу та розраховано час досягнення нижньої концентраційної межі поширення полум'я (НКМП) для замкненого приміщення об'ємом 36 м^3 . Встановлено, що обраний закон розподілу площі отвору суттєво впливає на час досягнення НКМП. Порівняння середніх значень ($\bar{X}$) для трьох вибірок показало значну розбіжність: 5,06 (Варіант 1), 3,39 (Варіант 2) та 16,31 (Варіант 3).

2. Проведено статистичний аналіз трьох згенерованих вибірок часу. Розраховані показники підтвердили невідповідність даних нормальному закону: виявлено значну різницю між середнім значенням та медіаною (наприклад, 5,06 проти 1,40 для Вибірки 1) та високі коефіцієнти правосторонньої асиметрії для всіх вихідних вибірок (5,16; 6,09; 1,73).

Також за допомогою формальних критеріїв узгодженості (Шاپіро-Вілکا та Колмогорова-Смірнова) доведено, що гіпотези про відповідність вибірок часу нормальному та гамма-розподілам спростовуються. Встановлено, що гіпотеза про логнормальний розподіл, який традиційно використовується для таких процесів, також була формально відхилена ($p < 0,05$) для всіх трьох вибірок. Візуальний аналіз логари-

фмованих даних за допомогою Q-Q графіків підтвердив результати формальних тестів. Для всіх трьох вибірок виявлено чітку S-подібну криву, що є ознакою лептокуртичного розподілу з "важкими хвостами". Це доводить, що стандартні моделі, включно з логнормальною, систематично недооцінюють ймовірність як аномально малих (найбільш небезпечних), так і аномально великих значень часу. Обмеженнями дослідження є моделювання для приміщення фіксованого об'єму (36 м³), припущення про миттєве перемішування газу та відсутність врахування вентиляції.

Література

1. Doroshenko D., Klyuchka Yu., Mikhailuk A. Analysis of the consequences of explosions and the conditions for the formation of gas-air mixtures in residential buildings. *Problems of fire safety*. 2020. Vol. 48. P. 37–44. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ppb_2020_48_8
2. Ismail M., Sharif K., Udin Z., Hassan M., Nawi M., Hamid Z., Ibrahim J., Othman A. A risk assessment in natural gas supply. *International Journal of Supply Chain Management*. 2018. Vol. 7. № 4. P. 180–184. doi: 10.59160/ijscm.v7i4.2371
3. Аналітична довідка про пожежі та їх наслідки в Україні за 12 місяців 2024 року. Київ, 2025. 39 с. URL: <https://dsns.gov.ua/upload/2/3/0/1/6/1/2/analitichna-dovidka-pro-pozezi-za-12-misiaciv-2024-na-sait.pdf>
4. Аналітична довідка про пожежі та їх наслідки в Україні за 12 місяців 2023 року. 7 с. URL: <https://dsns.gov.ua/upload/2/0/2/2/3/2/1/2023-rik.pdf>
5. Ключка Ю., Дорошенко Д. Оцінка часу досягнення пожежовибухонебезпечних концентрацій в приміщенні при розгерметизації балону з пропан-бутаном. *Комунальне господарство міст, Харків*. 2025. Том 3. № 191. С. 509–515. doi: 10.33042/2522-1809-2025-3-191-509-515
6. Ryder N., Jordan S., Jagruti M. NYSEARCH A Study for Natural Gas Dispersion and Detection in Residential Environments. 2021. P. 5. URL: https://www.nysearch.org/white-papers/WhitePaper_Dispersion_Study_in_Residential_Environments_V7.pdf
7. Muharam Y., Septian H. Simulation of Gas Leakage in a Gas Utilization System in Household Sector. *International Journal of Technology*. 2013. Vol. 4. Issue 3. P. 224–231. doi: 10.14716/ijtech.v4i3.118
8. Cioclea D., Ianc N., Boanta C. Dispersion of Methane in Closed Enclosures. *Journal of Environmental Protection and Ecology*. 2024. Vol. 1. Issue 1. P. 263–274. doi: 10.29227/IM-2024-01-29
9. Vrouwenvelder T., Bernt L. Probabilistic modelling of internal gas explosions. 2009. P. 19. URL: https://www.cost-tu0601.ethz.ch/Documents/Meetings/Ljubljana/FACTSHEETS/vrouwenvelder_3.pdf
10. Tchouvelev A., Cheng Z., Pignotti V. CFD modeling of gas release and dispersion: Prediction of flammable gas clouds. *Environmental Security*. 2007. P. 17. doi:10.1007/978-1-4020-6515-6_14
11. Leach S. J., Lowe D. J. Ventilation in relation to toxic and flammable gases in buildings. *Building Services Engineer*. 1973. Vol. 8. P. 289–310. URL: https://www.aivc.org/sites/default/files/members_area/medias/pdf/Airbase/airbase_00203.pdf
12. Rasyid A., Sukwika T., Ramli S., Citroatmojo S. Gas Leakage Risk Management of Biogas Powerplant Using ALOHA Gas Dispersion Modelling and Bow-Tie Analysis. *Journal of Universal Studies*. 2024. Vol. 4. Issue 10. P. 9160–9172.

doi: 10.59188/eduvest.v4i10.43673

13. U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board. Investigation Report: Dangers of Flammable Gas Accumulation. 2006. P. 1–10. URL: <https://www.csb.gov/file.aspx?DocumentId=5639>

14. Xuegang L., Hongchao J. Fluent in the Simulation of the Application of the Natural Gas Leakage. Proceedings of the 2nd International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks. 2012. P. 690–692. doi:10.2991/mems.2012.88

15. Minnesota Pollution Control Agency. Remediation Division Methane Guidance. 2025. P. 25. URL: <https://www.pca.state.mn.us/sites/default/files/c-rem3-32.pdf>

16. Kluchka Y., Krivtsova V., Borisenko V. Characterization expiration hydrogen gas from a cylinder. Problems of fire safety. 2011. Vol. 29. P. 84–91. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/1866/1/29.pdf>

Y. Klyuchka¹, DSc, Senior Researcher, Professor of the Department

D. Doroshenko², Specialist of the Department

R. Korniienko², PhD, Senior Researcher, Leading Researcher of the Department

¹National University of Urban Economy named by O.M. Beketov, Kharkiv, Ukraine

²National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

RESEARCH ON THE TIME TO REACH FIRE-HAZARDOUS CONCENTRATIONS IN A ROOM DURING A NATURAL GAS LEAK

The paper investigates the stochastic nature of the time it takes for natural gas (methane) to reach the lower flammability limit when it leaks in a closed room. The relevance of the problem is due to the widespread use of gas and increased risks, in particular, due to damage to infrastructure in the context of military aggression by the Russian. Since the time depends on many random factors, such as the mass flow rate of gas, which is determined by the pressure and the area of the leak, mathematical modeling of the gas accumulation process was performed for three scenarios of the area distribution of the leak. A detailed statistical analysis was performed for the three samples of time values obtained. The basic indicators (mean, median, standard deviation, asymmetry coefficient) were calculated and revealed a high right-sided asymmetry for all samples, indicating their non-compliance with the normal law. Testing the hypotheses of conformity to distributions (normal, gamma) using the Shapiro-Wilk and Kolmogorov-Smirnov criteria gave a negative result. Even the hypothesis of lognormal distribution, which is often used for similar processes, was rejected by formal tests using the same criteria. Visual analysis using a Q-Q plot confirmed the test results: for logarithmic time values, all three samples showed a clear S-shaped curve characteristic of leptokurtic distributions with “heavy tails.” This indicates that standard models, including the lognormal model, systematically underestimate the probability of both abnormally small and abnormally large values of the time to reach the lower concentration limit of flame propagation. The results obtained show the importance of taking into account “heavy tails” when assessing risks and developing preventive safety measures.

Keywords: methane, leakage, sampling, lognormal law, mass flow rate

References

1. Doroshenko, D., Klyuchka, Yu., Mikhailuk, A. (2020). Analysis of the consequences of explosions and the conditions for the formation of gas-air mixtures in residential buildings. Problems of fire safety, 48, 37–44. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ppb_2020_48_8

2. Ismail, M., Sharif, K., Udin, Z., Hassan, M., Nawi, M., Hamid, Z., Ibrahim, J., Othman, A. (2018). A risk assessment in natural gas supply. International Journal of Supply Chain Management, 7, 4, 180–184. doi: 10.59160/ijscm.v7i4.2371

3. Analitychna dovidka pro pozhezhi ta yikh naslidky v Ukraini za 12 misyatsiv 2024 roku. Kyiv, 39. Available at: <https://dsns.gov.ua/upload/2/3/0/1/6/1/2/analitichna-dovidka-pro-pozezi-za-12-misiaciv-2024-na-sait.pdf>
4. Analitychna dovidka pro pozhezhi ta yikh naslidky v Ukraini za 12 misyatsiv 2023 roku. Available at: <https://dsns.gov.ua/upload/2/0/2/2/3/2/1/2023-rik.pdf>
5. Klyuchka, Y., Doroshenko, D. (2025). Otsinka chasu dosyahnennya pozhezhovybukhone-bezpechnykh kontsentratsiy v prymishchenni pry roz'hermetyzatsiyi balonu z propan-butanom. Komunal'ne hospodarstvo mist, Kharkiv, 3(191), 509–515. doi: 10.33042/2522-1809-2025-3-191-509-515.
6. Ryder, N., Jordan, S., Jagruti, M. (2021). NYSEARCH A Study for Natural Gas Dispersion and Detection in Residential Environments, 5. Available at: https://www.nysearch.org/white-papers/WhitePaper_Dispersion_Study_in_Residential_Environments_V7.pdf.
7. Muharam, Y., Septian, H. (2013). Simulation of Gas Leakage in a Gas Utilization System in Household Sector. International Journal of Technology, 4(3), 224–231. doi: 10.14716/ijtech.v4i3.118
8. Cioclea, D., Ianc, N., Boanta, C. (2024). Dispersion of Methane in Closed Enclosures. Journal of Environmental Protection and Ecology, 1(1), 263–274. doi: 10.29227/IM-2024-01-29
9. Vrouwenvelder, T., Bernt, L. (2009). Probabilistic modelling of internal gas explosions, 1–19. Available at: https://www.cost-tu0601.ethz.ch/Documents/Meetings/Ljubljana/FACTSHEETS/vrouwenvelder_3.pdf
10. Tchouvelev, A., Cheng, Z., Pignotti, V. (2007). CFD modeling of gas release and dispersion: Prediction of flammable gas clouds. Environmental Security, 1–17. doi:10.1007/978-1-4020-6515-6_14
11. Leach, S. J., Lowe, D. J. (1973). Ventilation in relation to toxic and flammable gases in buildings. Building Services Engineer, 8, 289–310. Available at: https://www.aivc.org/sites/default/files/members_area/medias/pdf/Airbase/airbase_00203.pdf
12. Rasyid, A., Sukwika, T., Ramli, S., Citroatmojo, S. (2024). Gas Leakage Risk Management of Biogas Powerplant Using ALOHA Gas Dispersion Modelling and Bow-Tie Analysis. Journal of Universal Studies, 4(10), 9160–9172. doi: 10.59188/eduvest.v4i10.43673
13. U.S. (2006) Chemical Safety and Hazard Investigation Board. Investigation Report: Dangers of Flammable Gas Accumulation, 1–10. Available at: <https://www.csb.gov/file.aspx?DocumentId=5639>
14. Xuegang, L., Hongchao, J. (2012). Fluent in the Simulation of the Application of the Natural Gas Leakage. Proceedings of the 2nd International Conference on Consumer Electronics, Communications and Network, 690–692. doi:10.2991/mems.2012.88
15. Minnesota Pollution Control Agency. (2025). Remediation Division Methane Guidance, 25. Available at: <https://www.pca.state.mn.us/sites/default/files/c-rem3-32.pdf>
16. Kluchka, Y., Krivtsova, V., Borisenko, V. (2011). Characterization expiration hydrogen gas from a cylinder. Problems of fire safety, 29, 84–91. Available at: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/1866/1/29.pdf>

Надійшла до редколегії: 13.09.2025

Прийнята до друку: 13.10.2025