

*М. В. Кустов, д.т.н., доцент, нач. наук. відділу (ORCID 0000-0002-6960-6399)*

*А. С. Мельниченко, викл. каф. (ORCID 0000-0002-7229-6926)*

*Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна*

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА МОДЕЛІ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ НЕБЕЗПЕЧНИХ ГАЗІВ ПРИ ЇХ ОСАДЖЕННІ

Проведено експериментальну перевірку адекватності теоретичної моделі розповсюдження небезпечних газів у потоці повітря при його інтенсивному осадженні дисперсними струменями. Порівняльний аналіз результатів виконаних експериментів вкладається в довірчий інтервал, розрахований за критерієм Фішера з надійністю 0,95. Це засвідчує достовірність розроблених раніше математичних моделей сорбції небезпечних газів. Результати експериментів підтвердили високу інтенсивність сорбції аміаку водним потоком та продемонстрували, що використання водяних завіс може суттєво знизити розміри ураження атмосфери небезпечними газами. Для проведення достовірних експериментальних досліджень та моделювання умов осадження небезпечних газів на шляху розповсюдження повітряного потоку розроблена та створена експериментальна камера для дослідження сорбційних процесів. Розроблені експериментальна камера та методика проведення досліджень передбачають забезпечення безпеки при роботі з небезпечними газоподібними речовинами. Конструкційне виконання корпусу камери у вигляді витягнутого циліндра із мережею газоаналізаторів дозволяє вимірювати динаміку просторового розповсюдження газів при різній інтенсивності потоку. Методика проведення експерименту передбачає три основних змінних параметри – швидкість повітряного потоку, інтенсивність та дисперсність рідинного потоку та додаткові змінні параметри, що визначаються фізико-хімічною природою сорбційних процесів – температура та тиск навколишнього середовища, хімічний склад рідини. Використання при проведенні досліджень розробленої експериментальної камери дозволить вимірювати інтенсивність сорбційних процесів газоподібних речовин потоком дисперсних рідин, рідинних сумішей та розчинів. Проведено перевірку ефективності практичного використання методики прогнозування інтенсивності ліквідації надзвичайних ситуацій із викидом небезпечних газів.

**Ключові слова:** сорбція газів, експериментальна камера, дисперсний потік, інтенсивність осадження, критерій Фішера

### 1. Вступ

В багатьох галузях промисловості використовуються хімічні небезпечні речовини. При аваріях на таких підприємствах найбільшу загрозу становлять газоподібні небезпечні речовини. Це пов'язано із великою зоною хімічного забруднення атмосфери при їх викиді із технологічних апаратів. Якщо проаналізувати вміст небезпечних речовин на різних підприємствах, то найбільшу кількість становлять небезпечні гази аміак та хлор. Ці небезпечні речовини використовуються при виробництві добрив, очищення води та в якості хладагентів. Такі галузі використання призводять до їх широкого територіального розповсюдження. Для локалізації викиду небезпечних газів та ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій оперативно-рятувальні підрозділи використовують дрібнодисперсні розпилені струмені для осадження газу. Цей метод добре зарекомендував себе на практиці. Однак, для забезпечення безпеки роботи рятувальників в небезпечній зоні керівнику ліквідації аварії необхідно заздалегідь прогнозувати можливі сценарії розвитку аварії та зони хімічного забруднення.

Питання передчасного прогнозування зони ураження також актуальне при вирішенні питання евакуації населення, що може потрапити в зону ураження. Проте питання визначення можливих зон хімічного ураження є достатньо склад-

ним по причині впливу великої кількості факторів на цей процес. До таких факторів відноситься: умови навколишнього середовища, параметри викиду речовини із технологічного апарату та фізико-хімічні властивості самої речовини. Використання методів осадження хмари вносить ряд додаткових факторів. В практики цивільного захисту використовуються різні методики прогнозування зони викиду небезпечних хімічних газів. Ці методики дозволяють врахувати основні умови викиду та навколишнього середовища, однак, використання дрібнодисперсних струменів для осадження хмари в них не враховуються.

Таким чином, існуюча проблема полягає у неможливості прогнозування зони хімічного забруднення при роботі оперативно-рятувальних підрозділів по осадженню небезпечного газу.

## **2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми**

Для успішної ліквідації надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів використовується метод осадження небезпечної хмари дрібнодисперсними струменями, що створюються розпилюючими стволами [1]. Однак, їх кількість, місце розміщення та інтенсивність подачі рідини визначається керівником ліквідації аварії та умовами роботи аварійно-рятувальних підрозділів. Використання розпиленних струменів для осадження небезпечної хмари дозволяє суттєво знизити розміри зони забруднення або зовсім припинити розповсюдження хмари [2]. При масштабних викидах є необхідним передчасне прогнозування масштабів хімічного забруднення. Це дозволяє забезпечити безпеку праці рятувальників в зоні аварії та ефективно організувати евакуацію населення та матеріальних цінностей з можливих зон ураження [3]. Для оперативного прогнозування наслідків хімічного забруднення атмосфери використовуються різні підходи. Одним із методів прогнозування наслідків атмосферного забруднення є розрахунок майбутньої ситуації на основі динаміки її розвитку [4]. Такі підходи дозволяють врахувати всі фактори розвитку аварії. Це досягається за рахунок обробки великого масиву моніторингової інформації за допомогою рекурентного аналізу [5]. Однак, точність прогнозування такого методу на пряму залежить від об'єму бази моніторингових даних. В умовах надзвичайних ситуацій зазвичай неможливо зібрати великий масив даних із достатньою точністю.

Найбільшу розповсюдженість набули експрес-методики, які враховують лише найсуттєвіші фактори з певним кроком зміни параметрів [6]. Такий підхід дозволяє спростити процедуру розрахунку та збільшити оперативність роботи, однак, має низьку точність прогнозування. Більш ефективним методом прогнозування є використання автоматизованих програмних комплексів, таких як WISER [7] та ALOHA [8]. Такі програми дозволяють автоматизувати процес розрахунку із графічною візуалізацією результатів прогнозування та інтеграцією з картою місцевості. Ці програмні комплекси засновані на використанні математичних моделей просторової дифузії газів або моделей Гауса [9]. Використання рівняння дифузії дозволяє врахувати основні метеорологічні параметри навколишнього середовища, в якому розповсюджується газ. Додаткові модифікації цих моделей дозволяють врахувати умови викиду небезпечного газу із технологічного апарату [10]. Це є актуально для умов аварії, коли викид може протікати з різною інтенсивністю або взагалі припинено при блокуванні аварійного апарату. Однак, у всіх розглянутих вище роботах не враховується наявність дрібнодисперсних струменів для осадження хмари.

сних струменів, які можуть суттєво впливати на розміри зони ураження.

Осадження небезпечних газів з атмосфери відбувається за рахунок протікання процесів сорбції [11]. При цьому інтенсивність сорбції залежить не тільки від навколишніх умов, а й від поверхневих властивостей рідини та фізико-хімічних властивостей газу [12]. Так, наприклад, інтенсивність осадження аміаку чистою водою у порівнянні із хлором у 7–8 разів більша при однакових умовах.

Для теоретичного опису процесу сорбції використовуються, як безперервні моделі молекулярної динаміки [13], так й моделі пошарового масообміну [14]. Однак, такі моделі не враховують просторовий розподіл газу та його динаміку під впливом зовнішніх умов.

В роботі [15] висловлені припущення за якими може проводитись опис сукупного процесу розповсюдження газу у просторі при його осадженні дисперсними струменями. В цій роботі передбачені умови локалізації викиду небезпечного газу аварійно-рятувальними підрозділами. Враховано можливість варіації розмірів, форми та кількості розпилюючих пристроїв та інтенсивності подачі рідини. В роботі [16] розроблена модель прогнозування масштабів хімічного ураження за умов осадження небезпечної хмари та алгоритм її використання. Однак, експериментальна перевірка достовірності розробленої моделі не проведена.

Таким чином, невирішеною частиною проблеми є відсутність експериментального підтвердження працездатності, достовірності та ефективності розроблених раніше моделей прогнозування масштабів хімічного ураження за умов осадження небезпечної хмари.

### **3. Мета та задачі дослідження**

Метою дослідження є експериментальна перевірка достовірності моделі прогнозування масштабів хімічного ураження за умов осадження небезпечної хмари та перевірка ефективності методики на її основі.

Досягнення поставленої мети потребує вирішення наступних завдань:

1. Розробити експериментальну установку для дослідження процесів осадження газів.
2. Розробити методику проведення експериментальних досліджень по встановленню впливу осадження газу на динаміку його просторового розповсюдження.
3. Провести експериментальну перевірку достовірності моделі прогнозування масштабів хімічного ураження.
4. Дослідити ефективність методики прогнозування ефективності ліквідації аварій з викидом небезпечних газів.

### **4. Розробка експериментальної установки для дослідження процесів осадження газів**

Так як процеси осадження газів дрібнодисперсними струменями відноситься до масообмінних процесів, то за основою для конструкції експериментальної установки повинна бути класична схема масообмінних апаратів. Однак, необхідність паралельного дослідження просторової динаміки газів вимагає виконання установки відповідних габаритних розмірів.

Відома зустрічнопоточна масо- та теплообмінна колона, яка представляє собою циліндричний корпус для взаємодії зустрічних потоків диспергованої рідини та газу, має штуцери підводу та відводу потоків, в корпусі розміщено розпилювач рідини [17]. Суттєвим недоліком цих абсорберів є зустрічно-поточна схема руху

газу та рідини в середині корпусу апарату, що приводить до виносу рідинного аерозолу потоком газу, порушення рівномірності розподілу рідини по об'єму камери; також існують обмеження по дисперсності рідинного аерозолу.

Недолік виносу крапель рідини газовим потоком вирішено за рахунок використання прямооточного абсорбера, який складається з корпусу, штуцера входу та виходу газу та штуцера входу та виходу рідини (абсорбенту), розподільвача потоку рідини, масообмінної секції, каплевідбійника [18].

Недоліком цього пристрою є нерівномірність контакту газу з рідиною по об'єму камери за рахунок наявності масообмінних секцій, що ускладнює дослідження кінетики процесу масообміну. Крім того, в абсорбері відсутня вимірювальна газоаналізуюча апаратура для контролю процесу абсорбції та відсутня можливість зміни дисперсності аерозолу. Також дана конструкція не дозволяє досліджувати процеси осадження твердих продуктів горіння.

Найбільш близьким до зазначених вище вимог є камера для дослідження процесів масообміну, яка складається з вертикального герметичного корпусу, вентилятору, запірної арматури, форсунок для подачі води, газоаналізаторів та відсіку для горіння [19].

Недоліком такої камери є її вертикальна конструкція, що не дозволяє проводити дослідження процесів сорбції газів при їх горизонтальному розповсюдженні, відсутня можливість моделювання різної швидкості повітряного потоку та відсутня можливість виміру горизонтального розповсюдження газу.

В основу розробленої експериментальної установки покладене завдання створення камери для дослідження процесів сорбції газів, яка дозволить моделювати умови контакту рідинних аерозолів та газів (парів) при різних фізико-хімічних умовах процесу, яка не матиме вищенаведених недоліків, тобто забезпечуватиме горизонтальне розповсюдження газів при різній швидкості повітряного потоку, забезпечить подачу рідинного аерозолу в довільному місці на шляху розповсюдження газу та надасть змогу виміру просторового розповсюдження газу за трьома координатами (рис. 1).

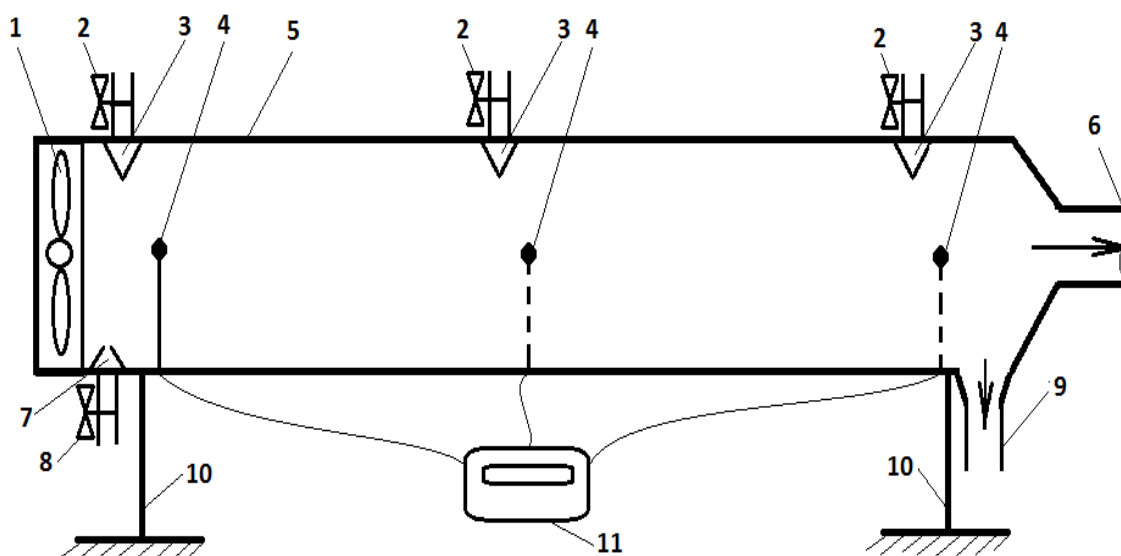


Рис. 1. Схема камери для дослідження процесів сорбції газів: 1 – вентилятор; 2 – рідинні запірні крани; 3 – рідинні форсунки; 4 – газоаналізатори; 5 – корпус; 6 – відвідний газопатрубок; 7 – газова форсунка; 8 – газовий запірний кран; 9 – відвідний рідинний патрубок; 10 – кріплення; 11 – блок індикації газоаналізаторів

Поставлене завдання вирішується за рахунок того, що камера для дослідження процесів сорбції газів, яка має циліндричну форму та виконана в герметичному виконанні, розміщена у вигляді горизонтальної труби. В якості розпилювачів використовуються з'ємні цільнофакельні форсунки з регулюванням інтенсивності та дисперсності потоку. З одного боку камера додатково обладнується вентилятором для руху газового середовища, з протилежного боку камера обладнана патрубком для виводу газового середовища у безпечне місце та зливним патрубком для відведення рідини.

### **5. Розробка методики проведення експериментальних досліджень**

Для візуального контролю процесу абсорбції камера (рис. 1) герметичного циліндричного корпусу 5 виконана з прозорою стінкою. Корпус камери 5 розміщено на кріпленнях 10. В верхній частині камери розміщені з'ємні цільнофакельні рідинні форсунки 3 з можливістю регулювання інтенсивності та дисперсності потоку. З'ємне виконання рідинних форсунок дозволяє змінювати місце розташування та їх кількість, що дає змогу досліджувати процеси сорбції газів рідинними аерозолями різної інтенсивності на різних етапах розповсюдження газової хмари. Рідинні форсунки 3 обладнані рідинними запірними кранами 2 для регулювання потоку рідини. Для моделювання газового потоку по об'єму камери з одного боку корпусу 5 встановлено повітряний вентилятор 1 зі змінною інтенсивністю обертання. Протилежний бік корпусу 5 обладнано патрубком 6 для відведення газового середовища із камери до небезпечного місця. Встановлені в довільному місці корпусу 5 газоаналізatori 4 дозволяють контролювати концентрацію газу в об'ємі камери. Кількість та місце розміщення газоаналізатору може змінюватись. Дані від мережі газоаналізаторів поступають до блоку індикації 11, де вони обробляються та візуалізуються. З одного боку корпусу 5 розміщено газову форсунку 7 для подачі газу в об'єм камери. Для регулювання інтенсивності подачі газу крізь форсунку 7 на її вході розміщено газовий запірний кран 8. Відпрацьована рідина зливається з камери крізь відповідний рідинний патрубок 9.

Методика проведення експериментальних досліджень на установці (рис. 1) полягає у наступному. Крізь форсунку 7 в камеру 5 подається газ, що досліджується. Інтенсивність подачі газу регулюється газовим запірним краном 8. Швидкість руху газу вздовж камери 5 регулюється обертами вентилятора 1, який ініціює рух газу від форсунки 7 до патрубку 6 для відведення газового середовища із камери в небезпечне місце, наприклад, під витяжну шафу. Горизонтальний розподіл концентрації газу вимірюється газоаналізаторами 4, розміщеними уздовж камери 5. Дані вимірів газоаналізаторів 4 виводяться до блоку індикації 11. Вздовж корпусу 5 встановлені рідинні форсунки 3, крізь які подається рідинний потік в об'єм камери. За допомогою форсунок 3 змінюється дисперсність потоку, а інтенсивність рідинного потоку регулюється запірними кранами 2. Відпрацьована рідина стікає по нижній частині камери до відповідного рідинного патрубку 9. При проході газової хмари крізь рідинний аерозольний потік відбувається сорбція газу, інтенсивність процесу сорбції визначається порівнянням розподілу концентрація газової хмари при всіх рівних умовах окрім відсутності та наявності рідинного потоку.

Розроблена камера дозволяє імітувати розповсюдження газів в повітрі технологічного апарату та довільне розповсюдження в атмосфері. При виборі грани-

чних значень швидкості нагнітання повітря та інтенсивності подачі рідини слід звертати увагу на габаритні властивості розробленої установки. Зазначені вище параметри обираються з урахуванням інертності спрацювання газоаналізаторів. Тобто динаміка просторової зміни концентрації газу в камері не повинна перевищувати інерційності роботи газоаналізаторів. Відповідно збільшення розмірів експериментальної камери дозволить розширити граничні значення параметрів, що досліджуються.

## 6. Експериментальна перевірка достовірності моделі прогнозування масштабів хімічного ураження

Відповідно до методики планування та проведення експериментів [20], дослідження по встановленню впливу осадження газу на динаміку його просторового розповсюдження проводились по три виміри при всіх однакових умовах. Якщо не спостерігалось у трьох вимірах суттєвих викидів, то для подальшого аналізу обиралося середнє значення. При виявленні викидів значень більше 25 %, це значення не враховувалось та проводився додатковий вимір. Дисперсність водяного потоку складала 1 мм. При дослідженні варіювались два параметри – швидкість потоку повітря та інтенсивність подачі дисперсного потоку. З метою забезпечення безпеки роботи із небезпечними отруйними речовинами експериментальні дослідження проводились у засобах індивідуального захисту та у лабораторних умовах із постійним відводом забрудненого повітря (рис. 2).



Рис. 2. Заходи безпеки при проведенні експериментальних досліджень

З метою вирішення цієї задачі проведено експеримент типу  $2^2$ . Для побудови полінома другого порядку користувалися методом Бокса-Вільсона [20], відповідно до якого використали ортогональні плани першого порядку як ядро, на якому потім добудовували конструкцію плану другого порядку. Переведення натуральних змінних у кодовані представлено у табл. 1.

**Табл. 1. Кодування даних**

Рівень та інтервал зміни факторів	Швидкість повітряного потоку, м/с	Інтенсивність дисперсного потоку, л/с
Нульовий рівень, $x_i=0$	3	1,2
Інтервал зміни, $\delta_i$	2,5	1
Верхній рівень, $x_i=1$	5,5	2,2
Нижній рівень, $x_i=-1$	0,5	0,2
Кодове позначення	X1	X2

Нижній рівень значень швидкості повітряного потоку та інтенсивності дисперсного потоку пояснюється необхідністю забезпечення проведення досліджень при значеннях у «зіркових» точках, які становлять  $\pm \sqrt{2}$ .

Верхнє значення швидкості повітряного потоку пов'язане із результатами аналізу погодних умов на території України, згідно до якого  $\sim 80\%$  періоду року швидкість повітря не перевищує 5,5 м/с. Верхнє значення інтенсивності дисперсного потоку відповідає тактико-технічним характеристикам пристроїв для подачі рідини, що є в розпорядженні аварійно-рятувальних підрозділів.

Матриця двофакторного експерименту по визначенню впливу осадження газу на динаміку його просторового розповсюдження наведена в табл. 2. Для порівняння результатів експериментів в табл. 2 також наведені результати чисельних розрахунків за тими ж параметрами.

**Табл. 2. Результати досліджень по осадженню аміаку**

Експеримент	X1(v)	X2(I)	Концентрація газу (експеримент) $q_e$ , г/м <sup>3</sup>	Концентрація газу (розрахунок) $q_m$ , г/м <sup>3</sup>
Планування типу 22	-1	-1	0,71	0,68
	+1	-1	0,65	0,67
	-1	+1	0,04	0,05
	+1	+1	0,11	0,09
Нульова точка	0	0	0,27	0,32

Графічна інтерпретація отриманих експериментальних даних із співставленням з результатами розрахунків за моделлю [16] представлено на рис. 3.

$$q = 0,106 \cdot I^2 - 0,001 \cdot v^2 - 0,6 \cdot I - 0,006 \cdot v + 0,013 \cdot I \cdot v + 0,827. \quad (1)$$

Перевірка адекватності моделі проводилась за критерієм Фішера:

$$F = \frac{s_{ад}^2}{s_0^2} \leq F_{(0,05; f_{ад}; f_y)}, \quad (2)$$

де  $s_{ад}^2 = \frac{\sum_{u=1}^m (y_u^- - y_u)^2}{n - k - 1}$ ;  $s_0^2$  – дисперсія нульової гіпотези;  $y_u$  – розрахункове значення відклику в  $u$ -му досліді;

$F_{(0,05; f_{ад}; f_y)}$  – критерій Фішера за 5% – го рівня значущості;  $f_{ад}$  – число ступенів свободи дисперсії адекватності;  $f_y$  – число ступенів свободи дисперсії відтворення.



$$F = 1,976 < F_{(0.05; f_{ад}; f_y)} = 2,164 . \quad (3)$$

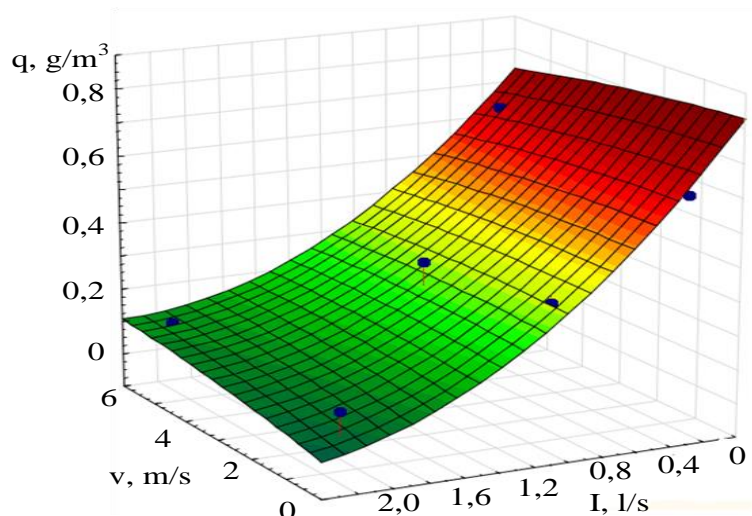


Рис. 3. Розподіл концентрації аміаку при різній швидкості повітряного потоку ( $v$ ) та інтенсивності дисперсного потоку рідини ( $I$ ): поверхня – розрахункові данні за моделлю [16]; крапки – експериментальні данні

Відповідно, перевірка адекватності моделі прогнозування масштабів хімічного ураження за умов осадження небезпечної хмари [16] дала позитивний результат.

## 7. Встановлення ефективності методики прогнозування ліквідації аварій з викидом небезпечних газів

Методики прогнозування ефективності ліквідації аварій з викидом небезпечних газів на основі запропонованої в роботі [16] та експериментально перевіреної вище моделі прогнозування масштабів хімічного ураження за умов осадження небезпечної хмари передбачає виконання трьох процедур. Перша процедура передбачає проведення моніторингу епіцентру викиду небезпечної хімічної речовини та зони розповсюдження хмари за допомогою стаціонарних систем моніторингу стану атмосферного повітря, проведення хімічної розвідки на місці аварії та використання лідарів на безпілотних літальних носіях.

Другий етап методики передбачає прогнозування інтенсивності осадження небезпечного газу дисперсними потоками з урахуванням наявних ресурсів. Для цього керівником ліквідації аварії проводиться оцінка наявних сил та засобів та проводиться розрахунок розмірів зони хімічного ураження з використанням моделі [16].

На третьому етапі керівник приймає управлінське рішення щодо безпечного розташування сил та засобів та проведення евакуації населення із зони ураження.

З метою перевірки ефективності практичного використання запропонованої методики проведено порівняльний аналіз основних параметрів аварії з викидом аміаку (табл. 3). В якості основи обрано опис ліквідації реальної хімічної аварії, що сталась на підприємстві «Стирол» у м. Горлівка у 2013 році. Для порівняння основні параметри аварії розраховані за допомогою діючої Методики прогнозування наслідків викидів (виливів) небезпечних хімічних речовин, яка затверджена наказом МВС України № 1000 від 29.11.2019 та з результатами прогнозування за запропонованою в роботі методикою.



**Табл. 3. Порівняльні данні параметрів аварії з викидом аміаку**

Параметри аварії з викидом аміаку	За описом аварії на заводі «Стирол» (2013 р.)	Розрахунок параметрів аварії за наказом МВС України № 1000 від 29.11.2019 р.	Розрахунок параметрів аварії за розробленою методикою
Розміри зони хімічного ураження до початку локалізації	3,4 км <sup>2</sup>	4,5 км <sup>2</sup>	3,7 км <sup>2</sup>
Розміри зони хімічного ураження через 15 хв. після початку локалізації	1,5 км <sup>2</sup>	4,5 км <sup>2</sup>	1,1 км <sup>2</sup>
Подано стволів на осадження	5 («Б»)	7 («Б»)	5 («Б»)
Кількість людей, що потрапило в зону хімічного ураження	127	600	450
Час осадження хмари	40 хв.	60-90 хв.	33 хв.

### 8. Обговорення результатів експериментальної перевірки достовірності моделі прогнозування масштабів хімічного ураження

Як видно (рис. 1) вздовж розробленої камери розміщено три блоки форсунок та газоаналізаторів. Особливістю розробленої експериментальної установки є можливість збільшення таких блоків, якщо це дозволяють габарити експериментальної установки. В якості перспективи доцільно зробити мережу газоаналізаторів, як по довжині камери, так і по висоті.

У реалізованій авторами дослідній установці це недоцільно, так як габаритні розміри внутрішнього об'єму камери незначні. Це призводить до того, що розподіл концентрації газу по висоті камери несуттєвий і вимір об'ємного розподілу не дасть адекватних результатів. При створенні лабораторної установки з діаметром газової камери  $>0,3$  м облаштування мережі газоаналізаторів дозволить досліджувати динаміку розподілу газу по всім трьом координатам, що суттєво розширить можливості розробленої установки.

Для розширення можливостей розробленої експериментальної камери (рис. 1) доцільно зробити опори 10 у телескопічному вигляді. Такі гази, як  $Cl_2$  та більшість бойових отруйних газів, мають густину  $>29$  кг/м<sup>3</sup>, що призводить до прояву деяких рідинних властивостей в повітрі. Для таких газів кут нахилу по шляху розповсюдження має суттєве значення. Дослідження цих ефектів для «важких» газів можливі при зміні кута нахилу розробленої камери.

Результати експериментальних досліджень з аміаком (рис. 3) показали суттєвий вплив наявності дисперсного осадження газу водою, що дозволяє знизити концентрацію газу у 15–17 разів. Така висока інтенсивність осадження пояснюється високим значенням коефіцієнту Генрі для аміаку, який становить  $H=0,27$  моль·м<sup>-3</sup>·Па<sup>-1</sup>. Слід зауважити, що коефіцієнт Генрі суттєво залежить, як від температури, так і від тиску, тому ці параметри необхідно фіксувати при проведенні експериментальних досліджень та враховувати при інтерпретації отриманих результатів. Незважаючи на те, що перевірка адекватності теоретичних розрахунків та експериментальних досліджень дала позитивний результат, з табл. 2 видно, що існує деяка похибка вимірювань. Для запропонованої компоновки ек-

периментальної установки основний внесок у виникнення похибок вимірювань чинить інерційність роботи газоаналізаторів. Усунути цей недолік можливо за рахунок використання менш енергійних та більш точних газових датчиків та апаратури обробки сигналу. Також підвищити точність вимірювань дозволить збільшення габаритних розмірів експериментальної камери.

Порівнюючи перший основний параметр аварії на «Стирол» (табл. 3), а саме: розміри зони хімічного ураження на момент прибуття першого рятувального підрозділу слід зазначити, що данні в описі аварії на «Стирол» взяті за результатами проведення первинної розвідки. Результати прогнозування розмірів зони хімічного ураження за запропонованою методикою мають розбіжність 8 % та більш наближені до реального стану у порівнянні із затвердженою методикою із розбіжністю 24 %. Це пояснюється тим, що в запропонованій методиці використовується математична модель на основі Гаусової моделі дифузії газів, в той час як затверджена методика заснована на табульованих значеннях розмірів зони із певним кроком. Додатковим фактором є навмисне завищення результатів прогнозування в затвердженій методиці із врахуванням коефіцієнту безпеки.

При порівнянні розмірів зони хімічного ураження після початку активного осадження використання даних затвердженої методики є некоректним так, як ця методика не передбачає врахування осадження небезпечних газів дисперсними потоками при розрахунках розмірів хімічного ураження. Затверджена методика передбачає лише рекомендовану кількість стволів для осадження хмари. Враховуючи суттєве завищення розмірів зони ураження затверджена методика відповідно рекомендує надлишкову кількість стволів – 7. При розрахунках за запропонованою методикою прогнозованої зони ураження при використанні 5 стволів «Б» отримали площу на 27 % меншу від реальної, що пояснюється оптимізацією розміщення рятувальників по площі ураження та можливістю ближчого розміщення ланок для осадження небезпечної хмари. Порівняльні данні по кількості постраждалих, що опинились в зоні хімічного ураження, показують розбіжність по запропонованій методиці в 3 рази, по затвердженій в 4 рази. Така значна розбіжність пояснюється методикою розрахунку кількості постраждалих, яка враховує густину наявності людей, яка відповідає житловим районам. При цьому переважна територія зони ураження знаходилась на території підприємства, але в зону ураження потрапили лише працівники «Стирол».

Оптимізація за запропонованою методикою процесу локалізації зони ураження також дозволяє зменшити час осадження хмари на 17 % від витраченого часу при реальній аварії та на 90–180 % від прогнозованого часу за затвердженою методикою. Основною перевагою та особливістю запропонованої методики є врахування процесів осадження газової хмари при довільній формі зони осадження. Однак, розробленій методиці притаманне таке обмеження, як висота зони осадження. Хоча математична модель здатна працювати при довільній висоті подачі дисперсного струменя, однак, сучасні технічні засоби здатні забезпечити максимальну висоту до 50 метрів. Перспективним напрямком розвитку даного дослідження слід вважати модифікацію методик до можливостей прогнозування наслідків викиду «важких» газів. Основним представником таких газів є хлор, який досить розповсюджений в промисловості та населених пунктах. При модифікації моделі слід вирішувати проблему врахування властивостей текучості таких газів в атмосфері.

## 9. Висновки

1. Розроблено експериментальну камеру для дослідження сорбції газів, яка дозволяє досліджувати динаміку газових потоків різної інтенсивності під впливом дисперсного рідинного потоку. Експериментальна камера має мережу газоаналізаторів, розповсюджену по об'єму камери та мережу розпилюючі форсунок для подачі дрібнодисперсного потоку рідини. В якості рідини осадження можливе використання як чистих рідин, так і рідинних сумішей та розчинів. Конструкційні особливості розробленої камери дозволяють забезпечити належну безпеку дослідників при роботі з небезпечними газами. Можливості дослідження сорбційних процесів забезпечуються для швидкості повітряного потоку в діапазоні від 0 до 6 м/с та дисперсності рідинного потоку до 0,1 мм.

2. Розроблено методику проведення експериментальних досліджень сорбції небезпечних газів за допомогою розробленої експериментальної камери. Запропонована методика представляє собою послідовність дій дослідника для якісного виміру просторового розподілу концентрації газів із врахуванням особливостей камери. При проведенні досліджень з небезпечними газами відбувається виведення газів із зони роботи дослідника та відведення забрудненої рідини для окремої утилізації чи дегазації.

3. Проведено експериментальні дослідження просторового розподілу аміаку при різній інтенсивності повітряного потоку та різній інтенсивності дисперсного потоку води при осадженні. Результати досліджень підтвердили високу інтенсивність сорбції аміаку водою, що дозволило знизити концентрацію газу у 15–17 разів. Для газів з низьким коефіцієнтом Генрі  $H < 0,05$  моль·м<sup>-3</sup>·Па<sup>-1</sup> доцільним є використання хімічних нейтралізаторів для підтримання високої інтенсивності осадження газів з атмосфери. Результати експериментальних досліджень підтвердили адекватність розробленої раніше моделі сорбції газів дисперсним потоком в атмосфері.

4. Встановлено, що використання запропонованої методики прогнозування інтенсивності ліквідації надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів, яка передбачає виконання трьох процедур, а саме: проведення моніторингу епіцентру викиду небезпечної хімічної речовини та зони розповсюдження хмари; прогнозування інтенсивності локалізації надзвичайної ситуації з урахуванням наявних ресурсів; прийняття управлінського рішення щодо ліквідації надзвичайної ситуації, дозволяє підвищити точність прогнозування зони хімічного ураження без осадження на 16% та при активному осадженні у 4 рази. Це дозволяє суттєво підвищити ефективність ліквідації хімічних аварій за рахунок більш інтенсивного осадження при мінімізації безпечної відстані для рятувальників та оптимізації інтенсивності подачі дисперсного потоку.

## Література

1. Pshinko O. M., Biliaiev M. M., Gunko O. Y. Localization of the air pollution zone in case of liquidation of an accident with chemically hazardous cargo. *Science and Transport Progress*. 2009. Vol. 27. P. 143–148. doi: 10.15802/stp2009/14261
2. Kustov M., Kalugin V., Hristich O., Hapon Y. Recovery method for emergency situations with hazardous substances emission into the atmosphere. *International Journal of Safety and Security Engineering*. 2021. Vol. 11(4). P. 419-426. doi:10.18280/ijss.110415
3. Talhofer V., Hořková-Mayerová Š. Method of Selecting a Decontamination Site Deployment for Chemical Accident Consequences Elimination: Application of

Multi-Criterial Analysis. ISPRS International Journal of Geo-Information. 2019. Vol. 8(4). P. 171. doi: 10.3390/ijgi8040171

4. Tatarinov V. V., Prus U. V., Kirsanov A. A. Decision support software for chemical accident elimination management. AIP Conference Proceedings. 2019. Vol. 2195. P. 020076. doi: 10.1063/1.5140176

5. Martínez-García M., Zhang Y., Suzuki K., Zhang Y. D. Deep Recurrent Entropy Adaptive Model for System Reliability Monitoring. IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2021. Vol. 17(2). P. 839-848. doi: 10.1109/TII.2020.3007152

6. Khan F., Rathnayaka S., Ahmed S. Methods and models in process safety and risk management: Past, present and future. Process Safety and Environmental Protection. 2015. Vol. 98. P. 116–147. doi: 10.1016/j.psep.2015.07.005

7. Carol S. WISER and REMM: Resources for Disaster Response. Journal of Electronic Resources in Medical Libraries. 2009. Vol. 6. P. 253–259. doi: 10.1080/15424060903167393

8. Polorecka M., Kubas J., Danihelka P., Petrlova K., Repkova Stofkova K., Buganova K. Use of Software on Modeling Hazardous Substance Release as a Support Tool for Crisis Management. Sustainability. 2021. Vol. 13. P. 438-453. doi: 10.3390/su13010438

9. Leelossy A., Molnar F., Izsak F., Havasi A., Lagzi I., Meszaros R. Dispersion modeling of air pollutants in the atmosphere: a review. Central European Journal of Geosciences. 2014. Vol. 6. P. 257-278. doi: 10.2478/s13533-012-0188-6

10. Yan X., Zhou Y., Diao H., Gu H., Li Y. Development of mathematical model for aerosol deposition under jet condition. Annals of Nuclear Energy. 2020. Vol. 142. P. 107394. doi: 10.1016/j.anucene.2020.107394

11. Elperin T., Fominykh A., Krasovitev B., Vikhansky A. Effect of rain scavenging on altitudinal distribution of soluble gaseous pollutants in the atmosphere. Atmospheric Environment. 2011. Vol. 45(14). P. 2427–2433. doi: 10.1016/j.atmosenv.2011.02.008

12. Kustov M., Melnychenko A., Taraduda D., Korogodska A. Research of the Chlorine Sorption Processes when its Deposition by Water Aerosol. In Materials Science Forum. 2021. Vol. 1038. P. 361–373. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1038.361

13. Gautam S., Liu T., Cole D. Sorption, Structure and Dynamics of CO<sub>2</sub> and Ethane in Silicalite at High Pressure: A Combined Monte Carlo and Molecular Dynamics Simulation Study. Molecules. 2019. Vol. 24(1). P. 99. doi: 10.3390/molecules24010099

14. Hua A. K., Lakey P. S., Shiraiwa M. Multiphase Kinetic Multilayer Model Interfaces for Simulating Surface and Bulk Chemistry for Environmental and Atmospheric Chemistry Teaching. Journal of Chemical Education. 2022. Vol. 99(3). P. 1246-1254. doi: 10.1021/acs.jchemed.1c00931

15. Кустов М. В., Басманов О. Є., Тарасенко О. А., Мельниченко А. С. Прогнозування масштабів хімічного ураження за умов осадження небезпечної речовини. Scientific Journal Problems of Emergency Situations. 2021. Т. 33. С. 72-83. doi: 10.52363/2524-0226-2021-33-6

16. Melnichenko A., Kustov M., Basmanov O., Tarasenko O., Bogatov O., Kravtsov M., Petrova O., Pidpala T., Karatieieva O., Shevchuk N. Devising a procedure to forecast the level of chemical damage to the atmosphere during active deposition of dangerous gases. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2022. Vol. 1(10(115)). P. 31–40. doi: 10.15587/1729-4061.2022.251675

17. Bell K. J. Heat Exchanger Design for the Process Industries. ASME. Journal Heat Transfer. 2004. Vol. 126(6). P. 877–885. doi: 10.1115/1.1833366

18. Tang L., Cao F., Li Y., Bao J., Ren Z. High performance mid-temperature selective absorber based on titanium oxides cermet deposited by direct current reactive sputtering of a single titanium target. Journal of Applied Physics. 2016. Vol. 119. P. 045102. doi: 10.1063/1.4940386

19. Merentsov N. A., Golovanchikov A. B., Topilin M. V., Persidskiy A. V., Tezikov D. A. Mass transfer apparatus for a wide range of environmental processes. IOP Publishing. Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1399. P. 055028. doi: 1088/1742-6596/1399/5/055028

20. Freeman L., Ryan F., Kensler J., Dickinson R., Vining G. A Tutorial on the Planning of Experiments. Quality Engineering. 2013. Vol. 25(4). P. 315-332. doi: 10.1080/08982112.2013.817013

*M. Kustov, DSc, Associate Professor, Deputy Head of Department  
A. Melnichenko, Lecturer of the Department  
National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine*

### EXPERIMENTAL VERIFICATION OF THE HAZARDOUS GAS DISTRIBUTION MODEL

An experimental verification of the adequacy of the theoretical model of the distribution of hazardous gases in the air stream during its intensive deposition by dispersed jets is carried out. Comparative analysis of the results of the experiments is embedded in the confidence interval calculated by Fisher's test with a reliability of 0,95. This testifies to the reliability of previously developed mathematical models of sorption of hazardous gases. The results of experiments confirmed the high intensity of sorption of ammonia by water flow and showed that the use of water curtains can significantly reduce the size of atmospheric damage by hazardous gases. To conduct reliable experimental research and model the conditions of deposition of hazardous gases in the path of air flow, an experimental chamber for the study of sorption processes was developed and created. The developed experimental chamber and research methods provide for safety when working with hazardous gaseous substances. The design of the chamber body in the form of an elongated cylinder with a network of gas analyzers allows you to measure the dynamics of the spatial distribution of gases at different flow intensities. The method of the experiment involves three main variable parameters – air flow rate, intensity and dispersion of liquid flow and additional variable parameters determined by the physicochemical nature of sorption processes – ambient temperature and pressure, chemical composition of the liquid. The use of the developed experimental chamber in research will allow to measure the intensity of sorption processes of gaseous substances by the flow of dispersed liquids, liquid mixtures and solutions. The efficiency of practical use of the method of forecasting the intensity of emergency response with the emission of hazardous gases was tested.

**Keywords:** gas sorption, experimental chamber, dispersed flow, concentration distribution, deposition intensity, model adequacy, Fisher's test

### References

1. Pshinko, O. M., Biliaiev, M. M., Gunko, O. Y. (2009). Localization of the air pollution zone in case of liquidation of an accident with chemically hazardous cargo. Science and Transport Progress, 27, 143–148. doi: 10.15802/stp2009/14261

2. Kustov, M., Kalugin, V., Hristich, O., Hapon, Y. (2021). Recovery method for emergency situations with hazardous substances emission into the atmosphere. International Journal of Safety and Security Engineering, 11(4), 419–426. doi:10.18280/ijss.110415

3. Talhofer, V., Hošková-Mayerová, Š. (2019). Method of Selecting a Decontamination Site Deployment for Chemical Accident Consequences Elimination: Application

of Multi-Criterial Analysis. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(4), 171. doi: 10.3390/ijgi8040171

4. Tatarinov, V. V., Prus, U. V., Kirsanov, A. A. (2019). Decision support software for chemical accident elimination management. *AIP Conference Proceedings*, 2195, 020076. doi: 10.1063/1.5140176

5. Martínez-García, M., Zhang, Y., Suzuki, K., Zhang, Y. D. (2021). Deep Recurrent Entropy Adaptive Model for System Reliability Monitoring. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(2), 839-848. doi: 10.1109/TII.2020.3007152

6. Khan, F., Rathnayaka, S., Ahmed, S. (2015). Methods and models in process safety and risk management: Past, present and future. *Process Safety and Environmental Protection*, 98, 116–147. doi: 10.1016/j.psep.2015.07.005

7. Carol, S. (2009). WISER and REMM: Resources for Disaster Response. *Journal of Electronic Resources in Medical Libraries*, 6, 253-259. doi: 10.1080/15424060903167393

8. Polorecka, M., Kubas, J., Danihelka, P., Petrlova, K., Repkova Stofkova, K., Buganova, K. (2021). Use of Software on Modeling Hazardous Substance Release as a Support Tool for Crisis Management. *Sustainability*, 13, 438-453. doi: 10.3390/su13010438

9. Leelossy, A., Molnar, F., Izsak, F., Havasi, A., Lagzi, I., Meszaros, R. (2014). Dispersion modeling of air pollutants in the atmosphere: a review. *Central European Journal of Geosciences*, 6, 257-278. doi: 10.2478/s13533-012-0188-6

10. Yan, X., Zhou, Y., Diao, H., Gu, H., Li, Y. (2020). Development of mathematical model for aerosol deposition under jet condition. *Annals of Nuclear Energy*, 142, 107394. doi: 10.1016/j.anucene.2020.107394

11. Elperin, T., Fominykh, A., Krasovitev, B., Vikhansky, A. (2011). Effect of rain scavenging on altitudinal distribution of soluble gaseous pollutants in the atmosphere. *Atmospheric Environment*, 45(14), 2427–2433. doi: 10.1016/j.atmosenv.2011.02.008

12. Kustov, M., Melnychenko, A., Taraduda, D., Korogodska, A. (2021). Research of the Chlorine Sorption Processes when its Deposition by Water Aerosol. In *Materials Science Forum*, 1038, 361-373. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1038.361

13. Gautam, S., Liu, T., Cole, D. (2019). Sorption, Structure and Dynamics of CO<sub>2</sub> and Ethane in Silicalite at High Pressure: A Combined Monte Carlo and Molecular Dynamics Simulation Study. *Molecules*, 24(1), 99. doi: 10.3390/molecules24010099

14. Hua, A. K., Lakey, P. S., Shiraiwa, M. (2022). Multiphase Kinetic Multilayer Model Interfaces for Simulating Surface and Bulk Chemistry for Environmental and Atmospheric Chemistry Teaching. *Journal of Chemical Education*, 99(3), 1246-1254. doi: 10.1021/acs.jchemed.1c00931

15. Kustov, M., Basmanov, O., Tarasenko, O., Melnichenko, A. (2021). Predicting the extent of chemical damage under the conditions of deposition of hazardous substances. *Scientific Journal Problems of Emergency Situations*, 33, 72-83. doi: 10.52363/2524-0226-2021-33-6

16. Melnichenko, A., Kustov, M., Basmanov, O., Tarasenko, O., Bogatov, O., Kravtsov, M., Petrova, O., Pidpala, T., Karatieieva, O., Shevchuk, N. (2022). Devising a procedure to forecast the level of chemical damage to the atmosphere during active deposition of dangerous gases. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(10(115)), 31–40. doi: 10.15587/1729-4061.2022.251675

17. Bell, K. J. (2004). Heat Exchanger Design for the Process Industries. *ASME. Civil Security*. DOI: 10.52363/2524-0226-2022-35-4



Journal Heat Transfer, 126(6), 877–885. doi: 10.1115/1.1833366

18. Tang, L., Cao, F., Li, Y., Bao, J., Ren, Z. (2016). High performance mid-temperature selective absorber based on titanium oxides cermet deposited by direct current reactive sputtering of a single titanium target. Journal of Applied Physics, 119, 045102. doi: 10.1063/1.4940386

19. Merentsov, N. A., Golovanchikov, A. B., Topilin, M. V., Persidskiy, A. V., Tezиков, D. A. (2019). Mass transfer apparatus for a wide range of environmental processes. IOP Publishing. Journal of Physics: Conference Series, 1399, 055028. doi: 1088/1742-6596/1399/5/055028

20. Freeman, L., Ryan, F., Kensler, J., Dickinson, R., Vining, G. (2013). A Tutorial on the Planning of Experiments. Quality Engineering, 25(4), 315-332. doi: 10.1080/08982112.2013.817013

Надійшла до редколегії: 19.04.2022

Прийнята до друку: 16.06.2022