

Державна служба України з надзвичайних ситуацій
Національний університет цивільного захисту України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Лесько Андрій Сергійович

УДК 614.8-06

ДИСЕРТАЦІЯ

**МЕТОД ПРОГНОЗУВАННЯ ЗОНИ ХІМІЧНОГО ЗАБРУДНЕННЯ ПРИ
ВИКИДІ ВАЖКИХ НЕБЕЗПЕЧНИХ ГАЗІВ**

263 – цивільна безпека

26 – цивільна безпека

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ А. С. Лесько

Науковий керівник

Кулаков Олег Вікторович,

кандидат технічних наук, доцент

Черкаси – 2026

АНОТАЦІЯ

Лесько А.С. Метод прогнозування зони хімічного забруднення при викиді важких небезпечних газів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 263 – Цивільна безпека. – Національний університет цивільного захисту України, Державна служба України з надзвичайних ситуацій, Черкаси, 2026.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню важливого науково-практичного завдання у галузі цивільного захисту – розробці методу прогнозування зони хімічного забруднення при викиді важких небезпечних газів з метою підвищення точності визначення параметрів зони хімічного забруднення шляхом моделювання розповсюдження хмари викиду важких небезпечних газів та їх осадження дрібнодисперсним рідинним потоком.

У **вступі** подано загальну характеристику дисертаційної роботи. Обґрунтована актуальність теми дисертації, сформульовано мету роботи та основні завдання дослідження, наведено зв'язок роботи з науковими програмами. Наведено дані про особистий внесок здобувача, апробацію роботи та публікації.

У **першому розділі** АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ПІДХОДІВ ДО ПРОГНОЗУВАННЯ ЗОНИ ХІМІЧНОГО ЗАБРУДНЕННЯ ПРИ ВИКИДІ ВАЖКИХ НЕБЕЗПЕЧНИХ ГАЗІВ проведено аналіз національної нормативної бази України щодо прогнозування зони хімічного забруднення при викиді небезпечних хімічних речовин. Встановлено, що питання прогнозування наслідків викиду небезпечних хімічних речовин під час аварій, організації гасіння пожеж, ліквідації аварій та захисту особового складу підрозділів оперативно-рятувальної служби цивільного захисту було актуальним з початку отримання Україною незалежності. Проведено аналіз фізико-хімічних властивостей таких небезпечних газів як аміак, синильна кислота (ціанід водню), соляна кислота, діоксид сірки, хлор та дихлорангідрид вугільної

кислоти (фосген). В процесі аналізу з'ясовано, що важчими відносно повітря є: соляна кислота, діоксид сірки, хлор та дихлорангідрид вугільної кислоти (фосген). Проаналізовано відомі надзвичайні ситуації техногенного характеру з викидом важких небезпечних газів, що трапилися у світі, порядок організації в Україні ліквідації надзвичайних ситуацій техногенного характеру з викидом важких небезпечних газів та діючі національні та відомі закордонні алгоритми прогнозування зони хімічного забруднення при викиді важких небезпечних газів.

У другому розділі ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ ОСАДЖЕННЯ ВАЖКИХ НЕБЕЗПЕЧНИХ ГАЗІВ ДРІБНОДИСПЕРСНИМ РІДИННИМ ПОТОКОМ запропоновано комплексну модель сорбції важких небезпечних газів дрібнодисперсним рідинним потоком, яка дозволяє врахувати всі ключові фактори процесу: основні параметри сорбції, параметри навколишнього середовища, характеристики рідинного потоку (що подається для осадження), а також фізико-хімічні властивості рідини в цьому потоці. Чисельне моделювання, проведене на прикладі газоподібного хлору, виявило, що при його осадженні визначальним параметром є константа Генрі, а не інтенсивність подачі рідинного потоку, як вважалося раніше. Це відкриття має вирішальне практичне значення, оскільки підтверджує нагальну потребу у використанні хімічних нейтралізаторів підрозділами оперативно-рятувальної служби цивільного захисту при ліквідації аварій із викидом такої небезпечної хімічної речовини в атмосферу. На основі цих даних було побудовано математичну модель дифузійного розповсюдження важких небезпечних газів в атмосфері за умови паралельного протікання процесу їх примусового осадження дрібнодисперсним потоком рідини. Модель створено шляхом розв'язання рівнянь Нав'є-Стокса з відповідними граничними умовами. Особливість цієї моделі полягає в тому, що вона враховує осадження важких небезпечних газів, яке відбувається за рахунок процесів сорбції газу краплинами рідини різної інтенсивності, під час його атмосферного розповсюдження. Подальші дослідження хімічної активності нейтралізаторів встановили, що для

практичного використання найбільш доцільними хімічними нейтралізаторами хлору є гідроксид натрію (NaOH) або гідроксид кальцію (Ca(OH)₂). Це дозволило розробити нову модель: на основі моделі нейтралізації хлору чистим дрібнодисперсним потоком води було побудовано модель хімічної нейтралізації хлору дрібнодисперсним потоком із додаванням нейтралізатора.

У третьому розділі РОЗРОБКА МЕТОДУ ПРОГНОЗУВАННЯ ЗОНИ ХІМІЧНОГО ЗАБРУДНЕННЯ ПРИ ВИКИДІ ВАЖКИХ НЕБЕЗПЕЧНИХ ГАЗІВ розроблено метод прогнозування зони хімічного забруднення при викиді важких небезпечних газів. Метод забезпечує інтеграцію математичних моделей динаміки важких газів у практичну діяльність, дозволяючи прогнозувати інтенсивність сорбції та розміри зони хімічного забруднення у разі аварійного викиду. Для дослідження процесу сорбції було створено **удосконалену** лабораторну установку у вигляді спеціальної камери. **Установка** обладнана датчиками газоаналізатора зі здатністю переміщуватися по вертикалі та газоаналізатором з блоком індикації. Проведено експериментальну перевірку адекватності розробленої моделі осадження та нейтралізації важких небезпечних газів дисперсним потоком рідини. Перевірка підтвердила адекватність моделі та відтворюваність процесу, надавши позитивний результат. Достовірність розроблених моделей і методу підтверджено розрахунками з довірчою ймовірністю 0,95 за критерієм Фішера. Крім того, ефективність запропонованого методу було підтверджено розрахунковим порівнянням із затвердженою методикою. У результаті досліджень було встановлено, що через низьке значення коефіцієнту дифузії хлору у повітрі за нормальних умов, швидкість його розповсюдження є на 65% меншою порівняно з аміаком. При осадженні хлору водою розмір зони ураження зменшується на 38%. Водночас, за аналогічних умов викиду та осадження аміаку, розміри його хмари зменшуються у 2,6 разів. На основі запропонованого алгоритму також створено програмну реалізацію методу – комп'ютерну програму «Прогноз важких небезпечних газів».

У четвертому розділі ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО ПРАКТИЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ МЕТОДУ ПРОГНОЗУВАННЯ ЗОНИ ХІМІЧНОГО ЗАБРУДНЕННЯ ПРИ ВИКИДІ ВАЖКИХ НЕБЕЗПЕЧНИХ ГАЗІВ на основі проведених досліджень було розраховано та підтверджено значний економічний ефект від впровадження інноваційного методу осадження хлору. Метод передбачає використання дрібнодисперсного потоку рідини, збагаченої спеціальними нейтралізуючими речовинами, що забезпечує швидке та ефективно осадження небезпечної речовини. Зокрема, на прикладі гіпотетичного, але цілком реалістичного викиду 20 тон хлору було доведено, що пряма економічна вигода від застосування цієї технології може досягати 40870 у.о. (1757,410 тис. грн. за курсом на 23.01.2026). Важливо підкреслити, що ця сума є лише початковим розрахунком і не включає запобігання значним екологічним збиткам та шкоді здоров'ю населення, які, безумовно, багаторазово перевищують цю цифру.

Паралельно з цим, для забезпечення готовності та оперативного реагування були розроблені ґрунтовні практичні рекомендації щодо застосування запропонованого методу прогнозування зони хімічного забруднення при викиді важких небезпечних газів, зокрема хлору. Ці рекомендації є вичерпними й включають опис повної процедури організації робіт на місці аварії. Особлива увага приділена адаптації цих процедур до умов воєнного періоду. Встановлено, що в сучасних реаліях реагування на хімічні аварії вимагає подолання подвійної загрози: по-перше, безпосередньої небезпеки хімічного зараження зони, а по-друге, постійної та високої небезпеки від ворожих обстрілів із застосуванням дронів і ракет. Таке критичне поєднання загроз вимагає абсолютно нового підходу до забезпечення безпеки персоналу та оперативності дій рятувальних служб, що й було враховано в розроблених рекомендаціях.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. *Вперше розроблено* математичну модель динаміки розповсюдження важких небезпечних газів з паралельним процесом їх осадження дисперсним рідинним потоком, яка створена шляхом розв'язання рівнянь Нав'є-Стокса з

відповідними граничними умовами, включає рівняння сорбції газу поверхнею краплі, рівняння масопереносу небезпечного газу в об'ємі краплі, рівняння швидкості хімічної реакції між нейтралізатором та небезпечним газом в об'ємі краплі та дозволяє розраховувати концентраційний розподіл небезпечного газу у приповерхневому шарі атмосфери при відповідних метеорологічних умовах та викиді газу з різною інтенсивністю та його осадженні.

2. *Вперше розроблено та програмно реалізовано* метод прогнозування зони хімічного забруднення при викиді важких небезпечних газів, який базується на математичній моделі динаміки розповсюдження важких небезпечних газів з паралельним процесом їх осадження дисперсним рідинним потоком та який, на відміну від існуючих, враховує особливості воєнного періоду та функціонує на основі трьох ключових блоків: моніторинг зони аварії з контролем стану загроз обстрілу; прогнозування наслідків при застосуванні активної нейтралізації та осадження небезпечного газу; прийняття управлінського рішення з урахуванням небезпек повторного обстрілу та маскування зон деконтамінації.

3. *Удосконалено* функціональну схему експериментальної лабораторної установки для дослідження процесів сорбції важких небезпечних газів, яка являє собою камеру, що обладнана форсунками для впорскування важких небезпечних газів, форсунками для впорскування води та датчиків газоаналізатору, що спроможні переміщуватися по вертикалі та яка дозволяє досліджувати кінетику сорбції небезпечних газів дисперсними потоками, кінетику їх нейтралізації та розповсюдження по поверхні різного кута нахилу (конструкція захищена патентом України на корисну модель №159622)

Практичне значення отриманих результатів полягає в розробці нових підходів до ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій на об'єктах, де відбуваються викиди у відкритий простір важких небезпечних газів. Розроблена в дисертації математична модель та програмні алгоритми її розв'язання можуть бути використані як основа для побудови комплексної

автоматизованої програми для прогнозування наслідків викидів важких небезпечних газів в атмосферу.

Розроблений метод прогнозування зони хімічного забруднення при викиді важких небезпечних газів може бути використаний оперативно-рятувальними службами при організації безпечної роботи рятувальників в зоні надзвичайної ситуації та при організації евакуації населення із потенційно небезпечних зон. Підрозділи цивільного захисту територіальних органів державної влади можуть використовувати запропонований метод прогнозування з метою розробки нових та уточнення існуючих планів з реагування на надзвичайні ситуації на хімічно небезпечних об'єктах, де обертаються важкі небезпечні гази, та на територіях, що прилягають до таких об'єктів.

Основні висновки дисертації доведено до рівня конкретних алгоритмів та прикладних рекомендацій. Отримані в дисертації результати можуть бути використані для оптимізації процесу моніторингу обстановки в зоні надзвичайної ситуації та спрощення роботи керівника ліквідації аварії при прийнятті управлінських рішень.

Результати дисертаційного дослідження впроваджено в практичному підрозділі (аварійно-рятувальний загін спеціального призначення) Головного управління ДСНС України в Харківській області, військовій частині А0998 Збройних Сил України та в навчальний процес Національного університету цивільного захисту України (м. Черкаси).

Ключові слова: безпека, військовий конфлікт, зона, зона військових дій, екологічна безпека, ймовірність, моніторинг, надзвичайна ситуація, надзвичайна ситуація воєнного характеру, небезпечний газ, осадження, прогноз, сорбція, управління, форма розливу, хімічна нейтралізація, хімічне забруднення, хлор, цивільна безпека, цивільний захист.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації у наукових фахових виданнях, проіндексованих у базах даних **Web of ScienceCore Collection** та/або **Scopus**:

1. **Lesko A.**, Kulakov O., Melnichenko A., Katunin A. Development and Implementation of an Algorithm for Predicting the Intensity of Sorption of Hazardous Gaseous Materials. *Solid State Phenomena*. ISSN: 1662-9779. 2024. Vol. 364. P. 101-112. URL: <https://doi.org/10.4028/p-QJRa2J>.

Особистий внесок – огляд існуючих алгоритмів прогнозування інтенсивності сорбції хімічно-небезпечних газоподібних матеріалів, програмна реалізація та практична апробація запропонованого алгоритму прогнозування інтенсивності сорбції небезпечних газоподібних матеріалів.

2. **Lesko A.**, Kulakov O., Roianov O., Katunin A. Intensity of Neutralization of Dangerous Gases During Deposition with Small-Dispersion Water. *Advances in Science and Technology*. ISSN: 1662-0356. 2025. Vol. 170. P. 17-25. URL: <https://doi.org/10.4028/p-z8MsON>.

Особистий внесок – проведення досліджень інтенсивності нейтралізації важких небезпечних газів дрібнодисперсною водою та отримання висновку, що при осадженні небезпечних газів у дрібнодисперсному потоці води визначальним параметром є константа Генрі небезпечного газу, а не інтенсивність подачі дрібнодисперсного потоку води.

Публікації у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України:

3. **Лесько А. С.** Інтенсивність хімічної нейтралізації хлору при осадженні дрібнодисперсним рідинним потоком. *Комунальне господарство міст: науково-технічний збірник*. Серія: технічні науки та архітектура. Харків, 2024. Т. 6. № 187. С. 278-283. DOI: 10.33042/2522-1809-2024-6-187-278-283. URL: <https://khg.kname.edu.ua/index.php/khg/article/view/6418/6339>

Стаття підготовлена здобувачем особисто.

4. **Лесько А. С.**, Кулаков О. В., Домолега С. О. Модель примусового осадження важких небезпечних газів. *Проблеми надзвичайних ситуацій:*

науковий журнал. Черкаси: НУЦЗ України. 2024. № 2 (40). С. 44-56. DOI: 10.52363/2524-0226-2024-40-4. URL: <http://pes.nuczu.edu.ua/images/arhiv/40/4---40-.pdf>.

Особистий внесок – аналіз літературних джерел, проведення розрахунків за побудованою моделлю примусового осадження важких небезпечних газів; також здобувач прийняв участь у аналітичному розв'язанні рівнянь Нав'є-Стокса з відповідними граничними умовами.

5. **Лесько А. С.,** Кулаков О. В., Катунін А. М., Маладика І. Г. Кінетика хімічної нейтралізації хлору дрібнодисперсним потоком води з нейтралізатором. *Проблеми надзвичайних ситуацій*: науковий журнал. Черкаси: НУЦЗ України. 2025. № 1 (41). С. 88-99. DOI: 10.52363/2524-0226-2025-41-6. URL: <http://pes.nuczu.edu.ua/images/arhiv/41/6.pdf>.

Особистий внесок – аналіз літературних джерел, проведення розрахунків за побудованою моделлю нейтралізації хлору дрібнодисперсним потоком води з хімічним нейтралізатором; також здобувач прийняв участь у побудові математичної моделі з використанням стандартного рівняння хімічної кінетики.

Патент України на корисну модель:

6. Камера для дослідження процесу сорбції важких газів: пат. 159622, МПК В01D 53/18 (2006.01), В01D 47/10 (2006.01) / Толок І. В., Рибка Є. О., Кулаков О. В., **Лесько А. С.**, Федченко С. М. № u 2024 05486; заяв. 20.11.2024; опубл. 18.06.2025, Бюл. № 25. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/25393>.

Особистий внесок – аналіз літературних джерел та ідея створення камери для дослідження процесу сорбції важких небезпечних газів, до складу якої входять циліндричний корпус, вентилятор, рідинні запірні крани, форсунки для впорскування води, газоаналізатор з блоком індикації, форсунку для впорскування газу, газовий запірний кран, опори, вихідний газо-повітряний отвір, зливні патрубки, пересувні датчики, вимірювач концентрації розчинених

у воді активних важких газів із зливним патрубком для безпечного відведення рідини.

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

7. **Лесько А. С.** Програмний комплекс прогнозування наслідків аварій з викидом небезпечних газів. *Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту: матеріали міжнародної науково-практичної конференції молодих учених.* Харків: НУЦЗУ, 25-26.04.2024 р. С. 526. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/20220>. (Форма участі – дистанційна).

Тези та доповідь підготовлено здобувачем особисто.

8. **Лесько А. С.,** Кулаков О. В., Мельниченко А. С., Катунін А. М. Реалізація алгоритму прогнозування інтенсивності сорбції небезпечних газоподібних матеріалів. *Problems of emergency situations: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції.* Харків:, НУЦЗУ, 16.05.2024 р. С. 234-235. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/20211>. (Форма участі – дистанційна).

Особистий внесок – огляд існуючих алгоритмів прогнозування інтенсивності сорбції хімічно-небезпечних газоподібних матеріалів, програмна реалізація та практична апробація запропонованого алгоритму прогнозування інтенсивності сорбції небезпечних газоподібних матеріалів.

9. **Лесько А. С.,** Кулаков О. В. Дослідження процесів хімічної нейтралізації хлору при осадженні аварійного викиду. *Актуальність та особливості наукових досліджень в умовах воєнного стану: матеріали IV Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції з нагоди відзначення Дня науки-2024 в Україні.* Київ: Державний науково-дослідний інститут МВС України, 22.05.2024 р. С. 312-315. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/22229>. (Форма участі – дистанційна).

Особистий внесок – аналіз розвитку аварії з викидом небезпечної хімічної речовини хлор, аналіз небезпечних властивостей хлору та способів його нейтралізації при аварійному викиді.

10. **Lesco A., Kulakov O.** Prevention of chlorine leakage by deposition in the conditions of military aggression. *СБУ в умовах військової агресії: сучасні реалії та інноваційні стратегії забезпечення національної безпеки: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції*. Київ: Інститут Служби Безпеки України Національного юридичного університету імені Ярослава Мудрого, 4-5.07.2024 р. С. 153-155. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/22230>. (Форма участі – дистанційна).

Особистий внесок – аналіз небезпечних властивостей хлору, аналіз наслідків бойового застосування хлору та способів його нейтралізації.

11. **Лесько А. С., Кулаков О. В.** Оперативні заходи реагування на надзвичайні ситуації, пов'язані з викидом хлору. *Об'єднання теорії та практики – запорука підвищення готовності оперативно-рятувальних підрозділів до виконання дій за призначенням: матеріали круглого столу*. Харків: НУЦЗУ, 22.11.2024 р. С. 136-139. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/22836>. (Форма участі – дистанційна).

Особистий внесок – пропозиції оперативних заходів реагування на надзвичайні ситуації, пов'язані з викидом хлору в умовах відкритого воєнного нападу на Україну.

12. **Лесько А. С., Кулаков О. В.** Дослідження процесів хімічної нейтралізації хлору при осадженні аварійного викиду. *Об'єднання теорії та практики – запорука підвищення готовності оперативно-рятувальних підрозділів до виконання дій за призначенням: матеріали круглого столу*. Харків: НУЦЗУ, 22.11.2024 р. С. 139-142. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/22837>. (Форма участі – дистанційна).

Особистий внесок – аналіз аварій з викидом небезпечної хімічної речовини хлор, аналіз небезпечних властивостей хлору та способів його нейтралізації при аварійному викиді в умовах відкритого воєнного нападу на Україну.

13. **Лесько А. С.,** Кулаков О. В. Математична модель розповсюдження важких газів у повітрі при примусовому осадженні. *Безпека людини у сучасних умовах: матеріали XVI Міжнародної науково-методичної конференції, Міжнародної наукової конференції Європейської Асоціації наук з безпеки (EAS).* Харків: Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 6-7.12.2024 р. С.25-27. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/23336>. (Форма участі – дистанційна).

Особистий внесок – аналіз літературних джерел, проведення розрахунків за побудованою моделлю примусового осадження важких небезпечних газів; також здобувач прийняв участь у аналітичному розв'язанні рівнянь Нав'є-Стокса з відповідними граничними умовами.

14. **Лесько А. С.,** Кулаков О. В. Сорбція важкого газу дрібнодисперсним потоком води при ліквідації надзвичайної ситуації. *Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції.* Львів: Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, 13.12.2024 р. С.183-184. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/23845>. (Форма участі – дистанційна).

Особистий внесок – математичний опис процесу сорбції важкого небезпечного газу (газу, що має густину більше 0,8 відносно до густини повітря) дрібнодисперсним водним потоком.

15. **Лесько А. С.,** Кулаков О. В. Дослідження ефективності осадження хімічно небезпечних газів дрібнодисперсним потоком води. *Запобігання виникненню надзвичайних ситуацій, реагування та ліквідація їх наслідків: матеріали круглого столу (вебінару).* Черкаси: НУЦЗУ, 28.02.2025 р. С.58-59.

URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/25049>. (Форма участі – дистанційна).

Особистий внесок – отримання залежностей інтенсивності осадження небезпечних газів аміак, соляна кислота, фосген, синильна кислота, діоксид сірки та хлор від інтенсивності подачі дрібнодисперсного потоку.

16. **Лесько А. С.,** Кулаков О. В. Інтенсивність нейтралізації небезпечних газів водним потоком при ліквідації надзвичайної ситуації. *Актуальні проблеми діяльності складових сектору безпеки і оборони України в умовах особливих правових режимів: поточний стан та шляхи вирішення: матеріали II-ї Міжнародної науково-практичної конференції*. Харків: Національна академія Національної гвардії України, 20.03.2025 р. С. 348-350. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/25050>. (Форма участі – дистанційна).

Особистий внесок – встановив, що нейтралізація з використанням водних потоків має найбільшу інтенсивність для хімічно небезпечних газоподібних матеріалів, що легко розчинюється у воді, а інтенсивність нейтралізації хімічно небезпечних газоподібних матеріалів, що погано розчинюється у воді є меншою.

17. **Лесько А. С.** Математичне моделювання примусового осадження хлору дрібнодисперсним потоком води. *Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту: матеріали міжнародної науково-практичної конференції молодих учених*. Черкаси: НУЦЗУ, 16-18.04.2025 р. С. 266. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/25051>. (Форма участі – дистанційна).

Тези та доповідь підготовлено здобувачем особисто.

18. **Лесько А. С.,** Кулаков О. В. Підвищення інтенсивності дегазації хлору при ліквідації надзвичайної ситуації. *Цивільний захист в умовах війни: матеріали I-ої Міжнародної науково-практичної конференції*. Львів: Львівській державний університет безпеки життєдіяльності, 17-18.04.2025 р. С.

96-98. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/25053>. (Форма участі – дистанційна).

Особистий внесок – встановив, що збільшення інтенсивності подачі дрібнодисперсного потоку чистої води при осадженні хлору з атмосфери не дозволяє досягти навіть середніх показників інтенсивності дегазації у порівнянні з іншими небезпечними газоподібними речовинами. Здобувачем особисто доведено, що для збільшення інтенсивності дегазації хлору до води слід додавати хімічно-активні речовини, зокрема сполуки лужних металів натрію, калію та кальцію (гідроксид натрію (NaOH), гідроксид калію (KOH), карбонат натрію (Na₂CO₃), гідроксид кальцію (Ca(OH)₂), сульфат натрію (Na₂SO₃), тіосульфат натрію (Na₂S₂O₃)).

19. **Лесько А. С.,** Кулаков О. В. Інтенсивність нейтралізації небезпечних газів при осадженні дрібнодисперсною водою. *Problems of emergency situations: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції*. Черкаси: НУЦЗУ, 14.05.2025 р. С. 306-307. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/25056>. (Форма участі – дистанційна).

Особистий внесок – дослідження інтенсивності нейтралізації небезпечних газів, що є як легшими так і важчими відносно повітря, при їх осадженні дрібнодисперсною водою.

20. **Лесько А. С.,** Кулаков О. В. Математична модель хімічної нейтралізації хлору при ліквідації надзвичайної ситуації. Безпека людини у сучасних умовах: матеріали XV Міжнародної науково-методичної конференції, Міжнародної наукової конференції Європейської Асоціації наук з безпеки (EAS). Харків: Національний технічний університет «Харківській політехнічний інститут», 4-5.12.2025 р. С.31-33. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/26580> (Форма участі – дистанційна).

Особистий внесок – проведення розрахунків за побудованою моделлю нейтралізації хлору дрібнодисперсним потоком води з хімічним

нейтралізатором; також здобувач прийняв участь у побудові математичної моделі з використанням стандартного рівняння хімічної кінетики.

ABSTRACT

Lesco A. S. Method for forecast of chemical contamination zones following the release of hazardous heavy gases. – Qualifying research paper, manuscript copyright.

Dissertation of Doctor of Philosophy Degree in Specialty 263 – Civil safety. – National University of Civil Protection of Ukraine, State Emergency Service of Ukraine, Cherkasy, 2026.

The dissertation is devoted to solving an important scientific and practical problem in the field of civil protection – the development of a method for forecast of chemical contamination zones following the release of hazardous heavy gases, with the aim of improving the accuracy of determining the parameters of such zones by modelling the dispersion of the release plume of hazardous heavy gases and their deposition by a finely dispersed liquid stream.

The introduction provides a general description of the dissertation. The relevance of the dissertation topic is substantiated, the purpose of the work and the main tasks of the research are formulated, and the connection of the work with scientific programs is shown. The data on the personal contribution of the applicant, work approbation and publications are presented.

In the first section ANALYSIS OF EXISTING APPROACHES TO FORECASTING CHEMICAL CONTAMINATION ZONES IN THE EVENT OF A RELEASE OF HAZARDOUS HEAVY GASES, the author analyses the regulatory framework of Ukraine for liquidation of consequences of emergencies with release of hazardous chemicals. It is shown that the issue of predicting the consequences of the release of hazardous chemicals during accidents, organizing firefighting, accident elimination and protection of personnel of the civil protection rescue service units has been relevant since Ukraine gained independence. An analysis of the physical and chemical properties of hazardous gases ammonia, hydrocyanic acid (hydrogen cyanide), hydrochloric acid, sulphur dioxide, chlorine and carbonic acid

dichlorohydrate (phosgene) was carried out. The analysis revealed that hydrochloric acid, sulphur dioxide, chlorine and carbonic acid dichlorohydrate (phosgene) are heavy relative to air. The author analyses the known man-made emergencies with the release of heavy hazardous gases that have occurred in the world, the procedure for organizing the liquidation of man-made emergencies with the release of heavy hazardous gases in Ukraine, and the existing national and well-known foreign methods for forecast of chemical contamination zones following the release of hazardous heavy gases.

In the second section RESEARCH ON THE INTENSITY OF PRECIPITATION OF HEAVY HAZARDOUS GASES BY A FINE-DISPERSED LIQUID STREAM, the proposed model of sorption of heavy hazardous gases by a fine liquid flow is comprehensive and allows taking into account all key factors of the process: the main sorption parameters, environmental parameters, characteristics of the liquid flow (supplied for deposition), as well as the physical and chemical properties of the liquid in this flow. Numerical modelling carried out on the example of gaseous chlorine revealed that the Henry's constant is the determining parameter in its deposition, and not the intensity of the liquid flow, as previously thought. This discovery is of crucial practical importance, as it confirms the urgent need for the use of chemical neutralizers by civil protection rescue units when responding to accidents involving the release of such a hazardous chemical into the atmosphere. On the basis of these data, a mathematical model of the diffusion of heavy hazardous gases in the atmosphere was built under the conditions of parallel processes of their forced deposition by a fine liquid flow. The model was created by solving the Navier-Stokes equations with appropriate boundary conditions. The peculiarity of this model is that it takes into account the deposition of heavy hazardous gases, which occurs due to the processes of gas sorption by liquid droplets of different intensity, during its atmospheric spread. Further studies of the chemical activity of neutralizers have shown that sodium hydroxide (NaOH) or calcium hydroxide (Ca(OH)₂) are the most appropriate chemical neutralizers of chlorine for practical use. This allowed us to develop a new model: based on the model of chlorine neutralization by a pure fine

water stream, a model of chemical chlorine neutralization by a fine water stream with the addition of a neutralizer was built.

In the third section DEVELOPMENT OF A METHOD FOR PREDICTING THE ZONE OF CHEMICAL CONTAMINATION FOLLOWING THE RELEASE OF HAZARDOUS HEAVY GASES, method has been developed for forecast of chemical contamination zones in the event of a release of hazardous heavy gases. This method ensures the integration of mathematical models of heavy gas dynamics into practical activities, allowing to predict the intensity of sorption and the size of the chemical contamination zone in the event of an accidental release. To study the sorption process, an advanced laboratory device in the form of a special chamber was constructed. The device is equipped with gas analyser sensors capable of vertical movement and a gas analyser with a display unit. Experimental verification of the adequacy of the developed model of deposition and neutralization of heavy hazardous gases by a dispersed liquid flow was carried out. The verification confirmed the adequacy of the model and the reproducibility of the process, providing a positive result. The reliability of the developed models and method was confirmed by calculations with a reliability of 0,95 according to Fisher's criterion. In addition, the effectiveness of the proposed method was confirmed by a computational comparison with the approved method. The research has shown that due to the low value of the diffusion coefficient of chlorine in air under normal conditions, its spreading rate is 65% lower compared to ammonia. When chlorine is precipitated by water, the size of the affected area is reduced by 38%. At the same time, under similar conditions of ammonia emission and deposition, the size of its cloud decreases by 2,6 times. Based on the proposed algorithm, a software implementation of the method was also created – the computer program «Forecast of heavy hazardous gases».

In the fourth section PROPOSAL FOR THE PRACTICAL IMPLEMENTATION OF THE METHOD FOR FORECAST OF CHEMICAL CONTAMINATION ZONES FOLLOWING THE RELEASE OF HAZARDOUS HEAVY GASES, based on the studies conducted, a significant economic effect from the introduction of an innovative method of chlorine deposition was calculated and

confirmed. This method involves the use of a finely dispersed liquid stream enriched with special neutralizing agents, which ensures fast and efficient deposition of the hazardous substance. In particular, using a hypothetical but realistic emission of 20 tons of chlorine, it was proved that the direct economic benefit from the application of this technology could reach USD 40870. It is important to emphasize that this amount is only an initial calculation and does not include the prevention of significant environmental and health damage, which is certainly many times higher than this value.

At the same time, to ensure preparedness and prompt response, I have developed detailed practical recommendations for the application of the proposed method for forecast of chemical contamination zones following the release of hazardous heavy gases such as chlorine. These recommendations are a comprehensive document that includes an additional description of the full procedure for organizing work at the accident site. Particular attention is paid to the adaptation of these procedures to wartime conditions. It is shown that in today's realities, responding to chemical accidents requires overcoming a double threat: first, the immediate danger of chemical contamination of the area, and second, the constant and high danger from enemy shelling using drones and missiles. This critical combination of threats requires an entirely new approach to ensuring personnel safety and the efficiency of rescue services, which was taken into account in the developed recommendations.

Scientific novelty of the obtained results.

1. For the first time, a mathematical model of the dynamics of heavy hazardous gas propagation with a parallel process of their deposition by a dispersed liquid flow has been developed, which is created by solving the Navier-Stokes equations with appropriate boundary conditions, including the equation of gas sorption by the droplet surface, the equation of mass transfer of hazardous gas in the droplet volume, the equation of the rate of chemical reaction between the neutralizer and the hazardous gas in the droplet volume and allows calculating the concentration distribution of the hazardous gas in the near-surface layer of the atmosphere under

appropriate meteorological conditions and different intensities of gas emission and deposition.

2. For the first time, a method for forecast of chemical contamination zones following the release of hazardous heavy gases has been developed and implemented in software, based on a mathematical model of the dynamics of the spread of heavy hazardous gases with a parallel process of their deposition by a dispersed liquid flow, which, unlike existing ones, takes into account the peculiarities of the war period and functions on the basis of three key blocks – monitoring of the accident area with control over the state of shelling threats, forecasting the consequences of active neutralization and deposition of hazardous gas and making management decisions taking into account the risks of repeated shelling and masking of decontamination zones.

3. The functional diagram of an experimental laboratory device for studying the sorption processes of heavy hazardous gases has been improved; the device consists of a chamber equipped with nozzles for injecting heavy hazardous gases, nozzles for injecting water and gas analyser sensors capable of vertical movement, and which allows the investigation of the kinetics of hazardous gas sorption by dispersed flows, the kinetics of their neutralisation and their distribution across surfaces with varying angles of inclination (the design is protected by Ukrainian utility model patent No. 159622).

The practical significance of the obtained results lies in the development of new approaches to eliminating the consequences of emergencies at facilities where heavy hazardous gases are released into the open space. The mathematical model and software algorithms developed in this thesis can be used as a basis for building a comprehensive automated program for predicting the consequences of heavy hazardous gas emissions into the atmosphere.

The developed method for forecast of chemical contamination zones following the release of hazardous heavy gases can be used by operational and rescue services in organizing the safe work of rescuers in the emergency area and in organizing the evacuation of the population from potentially dangerous areas. The civil protection

units of territorial state authorities can use the proposed forecasting methodology to develop new and refine existing emergency response plans at chemically hazardous facilities with heavy hazardous gases and in the territories adjacent to such objects.

The main conclusions of the dissertation have been brought to the level of specific algorithms and applied recommendations. The results obtained in the thesis can be used to optimize the process of monitoring the situation in the emergency zone and simplify the work of the head of the accident response in making management solutions.

Keywords: area, bottle size, civil protection, civil security, chemical neutralisation, chemical pollution, chlorine, dangerous gases, deposition, ecological safety, emergency, forecast, management, military affected area, monitoring, military conflict, military emergency, probability, safety, sorption.

LIST OF PUBLICATIONS OF DEGREE-SEEKER

Scientific papers in which the main scientific results of the dissertation are published:

Publications in scientific journals indexed in the Web of Science Core Collection and/or Scopus databases:

1. Lesko A., Kulakov O., Melnichenko A., Katunin A. (2024) Development and Implementation of an Algorithm for Predicting the Intensity of Sorption of Hazardous Gaseous Materials. *Solid State Phenomena*. ISSN: 1662-9779. Vol. 364. P. 101-112. URL: <https://doi.org/10.4028/p-QJRa2J>.

The acquirer personally reviewed the existing algorithms for predicting the intensity of sorption of chemically hazardous gaseous materials, software implementation and practical testing of the proposed algorithm for predicting the intensity of sorption of hazardous gaseous materials.

2. Lesko A., Kulakov O., Roianov O., Katunin A. (2025) Intensity of Neutralization of Dangerous Gases During Deposition with Small-Dispersion Water.

Advances in Science and Technology. ISSN: 1662-0356. Vol. 170. P. 17-25. URL: <https://doi.org/10.4028/p-z8MsON>.

The acquirer personally conducted research on the intensity of neutralization of heavy hazardous gases by fine water and concluded that the determining parameter in the deposition of hazardous gases in a fine water stream is the Henry constant of the hazardous gas, not the intensity of the fine water stream.

Publications in scientific journals included in the list of scientific and professional journals of Ukraine as of the date of publication:

3. **Lesco A.** (2024) Intensity of Chemical Neutralization of Chlorine During Precipitation by a Finely Dispersed Liquid Stream. [Intensyvniat khimichnoi neutralizatsii khloru pry osadzhenni drobnydispersnym ridynnym potokom]. *Scientific and technical collection «Municipal economy of cities»*. Vol. 6. No 187. P. 278-283. [in Ukraine]. DOI: 10.33042/2522-1809-2024-6-187-278-283. URL: <https://khg.kname.edu.ua/index.php/khg/article/view/6418/6339>.

The article was prepared by the acquirer personally.

4. **Lesco A., Kulakov O., Domoleha S.** (2024) Model of Forced Deposition of Heavy Dangerous Gases. [Analiz stanu nebezpeky na ob'yektakh zberihannya khloru]. *Problemy nadzvychaynykh sytuatsiy – Problems of emergency situations*. Issue 2 (40). P. 44-56. [in Ukraine]. DOI: 10.52363/2524-0226-2024-40-4. URL: <http://pes.nuczu.edu.ua/images/arhiv/40/4---40-.pdf>.

The acquirer personally analyzed the literature, carried out calculations based on the model of forced deposition of heavy hazardous gases; the applicant also took part in the analytical solution of the Navier-Stokes equations with the corresponding boundary conditions.

5. **Lesco A., Kulakov O., Katunin A., Maladyka I.** (2025) Kinetics of Chemical Neutralisation of Chlorine by a Small Dispersed Water Stream with a Neutralizer. [Kinetyka khimichnoi neitralizatsii khloru drobnydispersnym potokom vody z neitralizatorom]. *Problemy nadzvychaynykh sytuatsiy – Problems of emergency situations*. Issue 1 (41). P. 88-99. [in Ukraine]. DOI: 10.52363/2524-0226-2025-41-6. URL: <http://pes.nuczu.edu.ua/images/arhiv/41/6.pdf>.

The acquirer personally analyzed the literature, carried out calculations based on the built model of chlorine neutralization by a fine water flow with a chemical neutralizer; the applicant also took part in the construction of a mathematical model using the standard chemical kinetics equation.

Utility model patent of Ukraine:

6. Chamber for studying the process of heavy gas sorption. [Kamera dlia doslidzhennia protsesu sorbtsii vazhkykh haziv]: patent. 159622, IPC B01D 53/18 (2006.01), B01D 47/10 (2006.01) / Tolok I., Rybka E., Kulakov O., **Lesco A.**, Fedchenko S. № u 2024 05486 at 20.11.2024; published 18.06.2025, Bulletin № 25. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/25393>.

The acquirer personally analyzed the literature and came up with the idea of creating a chamber for studying the process of heavy gas sorption. The chamber contains a cylindrical body, a fan, liquid shut-off valves, water injection nozzles, a gas analyzer with an indication unit, a gas injection nozzle, a gas shut-off valve, supports, and a gas-air outlet. Contains drain pipes, mobile sensors, a meter for the concentration of active heavy gases dissolved in water with a drain pipe for safe liquid drainage.

Scientific works certifying the practical of the dissertation materials:

7. **Lesco A.** (2024) Program for predicting the consequences of accidents involving the release of hazardous gases. [Prohramnyi kompleks prohnozuvannia naslidkiv avarii z vykydom nebezpechnykh haziv]. *Problems and Prospects of Civil Protection: International Scientific and Practical Conference of Young Scientists*. National University of Civil Protection of Ukraine, Kharkiv, Ukraine, April 25-26, 2024. P. 526. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/20220>. (Participation format: online).

Abstracts and report prepared by the acquirer personally.

8. **Lesco A.**, Kulakov O., Melnychenko A., Katunin A. (2024) Implementation of an algorithm for predicting the intensity of sorption of hazardous gaseous materials [Realizatsiia alhorytmu prohnozuvannia intensyvnosti sorbtsii nebezpechnykh hazopodibnykh materialiv]. *Problems of emergency situations: International*

Scientific and Practical Conference. National University of Civil Protection of Ukraine, Kharkiv, Ukraine, May 16, 2024. P. 234-235. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/20211>. (Participation format: online).

The acquirer personally reviewed the existing algorithms for predicting the sorption intensity of chemically hazardous gaseous materials, implemented and tested the proposed algorithm for predicting the sorption intensity of hazardous gaseous materials.

9. **Lesco A.**, Kulakov O. (2024) Investigation of chemical neutralization of chlorine during the precipitation of an accidental release [Doslidzhennia protsesiv khimichnoi neitralizatsii khloru pry osadzhenni avariinoho vykydu]. *Relevance and Peculiarities of Scientific Research under Martial Law: IV-th International Scientific and Practical Internet Conference on the occasion of the Science Day-2024 in Ukraine*. State Research Institute of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine, Kyiv, Ukraine, May 22, 2024. P. 312-315. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/22229>. (Participation format: online).

The acquirer will personally analyze accidents involving the release of the hazardous chemical chlorine, analyze the hazardous properties of chlorine and ways to neutralize it in case of an accidental release.

10. **Lesco A.**, Kulakov O. (2024) Prevention of chlorine leakage by deposition in the conditions of military aggression. *SSU in the Context of Military Aggression: Modern Realities and Innovative Strategies for Ensuring National Security: International Scientific and Practical Conference*. Institute of the Security Service of Ukraine, Yaroslav Mudryi National Law University, Kyiv, Ukraine, June 4-5, 2024. P. 153-155. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/22230>. (Participation format: online).

The acquirer will personally analyzed accidents involving the release of the hazardous chemical chlorine, analyzed the hazardous properties of chlorine and ways to neutralize it in combat use.

11. **Lesco A., Kulakov O.** (2024) Operational actions to respond to emergencies related to chlorine releases [Operatyvni zakhody reahuvannia na nadzvychni situatsii, poviazani z vykydom khloru]. *Combining theory and practice – a key to improving the readiness of operational and rescue units to perform their assigned tasks: Panel discussion*. National University of Civil Protection of Ukraine, Kharkiv, Ukraine, November 22, 2024. P. 136-139. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/22836>. (Participation format: online).

The acquirer personally proposed operational measures to respond to emergencies related to the release of chlorine in the context of an open military attack on Ukraine.

12. **Lesco A., Kulakov O.** (2024) Investigation of chemical neutralization of chlorine during the precipitation of an accidental release [Doslidzhennia protsesiv khimichnoi neitralizatsii khloru pry osadzhenni avariinoho vykydu]. *Combining theory and practice – a key to improving the readiness of operational and rescue units to perform their assigned tasks: Panel discussion*. National University of Civil Protection of Ukraine, Kharkiv, Ukraine, November 22, 2024. P. 139-142. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/22837>. (Participation format: online).

The acquirer will personally analyzed accidents involving the release of the hazardous chemical chlorine, analyzed the hazardous properties of chlorine and ways to neutralize it in case of an accidental release in the event of an open military attack on Ukraine.

13. **Lesco A., Kulakov O.** (2024) Mathematical model of heavy gas propagation in air during forced deposition [Matematychna model rozpovsiudzhennia vazhkykh haziv u povitri pry prymusovomu osadzhenni]. *Human Security in Modern Conditions: XVI-th International Scientific and Methodological Conference, International Scientific Conference of the European Association of Security Sciences (EAS)*. National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine, December 6-7, 2024. P. 25-27. URL:

<http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/23336>. (Participation format: online).

The acquirer personally analyzed the literature, carried out calculations based on the model of forced deposition of heavy hazardous gases; the applicant also took part in the analytical solution of the Navier-Stokes equations with the corresponding boundary conditions.

14. **Lesco A.**, Kulakov O. (2024) Sorption of heavy gas by a fine water stream during emergency situation response [Sorbtsiia vazhkoho hazu dribnodispersnym potokom vody pry likvidatsii nadzvychainoi sytuatsii]. *Actual Problems of Fire Safety and Emergency Prevention in the Current Situation: International Scientific and Practical Conference*. Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine, December 13, 2024. P. 183-184. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/23845>. (Participation format: online).

The acquirer personally developed a mathematical description of the process of sorption of a heavy hazardous gas (a gas with a density greater than 0.8 relative to the density of air) by a finely dispersed water stream.

15. **Lesco A.**, Kulakov O. (2025) Investigation of the efficiency of deposition of celestial gases by a fine water stream [Doslidzhennia efektyvnosti osadzhennia khimichno nebechnykh haziv dribnodispersnym potokom vody]. *Prevention of emergencies, response and elimination of their consequences: Panel discussion (webinar)*. National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine, February 28, 2025. P. 58-59. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/25049>. (Participation format: online).

The acquirer is personally responsible for obtaining the dependences of the intensity of deposition of hazardous gases on the intensity of the dispersed flow for ammonia, hydrochloric acid, phosgene, hydrocyanic acid, sulfur dioxide and chlorine.

16. **Lesco A.**, Kulakov O. (2025) Intensity of neutralization of hazardous gases by water flow during emergency response [Intensyvniist neitralizatsii nebezpechnykh haziv vodnym potokom pry likvidatsii nadzvychnoi situatsii]. *Actual Problems of the Security and Defense Sector of Ukraine in the Context of Special Legal Regimes: Current Status and Ways of Solution: II-nd International Scientific and Practical Conference*. National Academy of the National Guard of Ukraine, Kharkiv, Ukraine, March 20, 2025. P. 348-350. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/25050>. (Participation format: online).

The acquirer has personally shown that neutralization using water flows has the highest intensity for chemically hazardous gaseous materials that are easily soluble in water, and the intensity of neutralization of chemically hazardous gaseous materials that are poorly soluble in water is lower.

17. **Lesco A.** (2025) Mathematical modelling of forced chlorine precipitation by a fine water flow [Matematychni modeliuvannia prymusovoho osadzhennia khloru dribnodispersnym potokom vody]. *Problems and Prospects of Civil Protection: International Scientific and Practical Conference of Young Scientists*. National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine, April 16-18, 2025. P. 266. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/25051>. (Participation format: online).

Abstracts and report prepared by the acquirer personally.

18. **Lesco A.**, Kulakov O. (2025) Increasing the intensity of chlorine degassing during emergency response [Pidvyshchennia intensyvnosti dehazatsii khloru pry likvidatsii nadzvychnoi situatsii]. *Civilian Protection in Time of War: I-st International Scientific and Practical Conference*. Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine, April 17-18, 2025. P. 96-98. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/25053>. (Participation format: online).

The acquirer has personally shown that increasing the intensity of the supply of a finely dispersed stream of clean water during the deposition of chlorine from the

atmosphere does not allow to achieve even average indicators of the intensity of degassing compared to other hazardous gaseous substances. The applicant has personally proved that to increase the intensity of chlorine degassing, chemically active substances should be added to the water, in particular, compounds of alkali metals of sodium, potassium and calcium (sodium hydroxide (NaOH), potassium hydroxide (KOH), sodium carbonate (Na₂CO₃), calcium hydroxide (Ca(OH)₂), sodium sulfite (Na₂SO₃), sodium thiosulfate (Na₂S₂O₃)).

19. **Lesco A.**, Kulakov O. (2025) Intensity of neutralization of hazardous gases during precipitation with fine water [Intensyvnist neutralizatsii nebezpechnykh haziv pry osadzhenni drobnydispersnoiu vodoiu]. *Problems and Prospects of Civil Protection: International Scientific and Practical Conference of Young Scientists*. National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine, April 14, 2025. P. 306-307. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/25056>. (Participation format: online).

The acquirer will personally study the intensity of neutralization of hazardous gases, both light and heavy relative to air, when they are precipitated by finely dispersed water.

20. **Lesco A.**, Kulakov O. (2025) A mathematical model of chemical neutralization of chlorine during emergency response [Matematichna model himichnoyi nejtralizaciyi hloru pri likvidaciyi nadzvichajnoyi situaciyi]. *Human Security in Modern Conditions: XV-th International Scientific and Methodological Conference, International Scientific Conference of the European Association of Security Sciences (EAS)*. National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine, December 4-5, 2025. P. 31-33. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/26580>. (Participation format: online).

The acquirer personally carried out calculations based on the built model of chlorine neutralization by a fine water flow with a chemical neutralizer; the applicant also took part in the construction of a mathematical model using the standard chemical kinetics equation.

ЗМІСТ

	Стор.
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	31
ВСТУП.....	32
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ПІДХОДІВ ДО ПРОГНОЗУВАННЯ ЗОНИ ХІМІЧНОГО ЗАБРУДНЕННЯ ПРИ ВИКИДІ ВАЖКИХ НЕБЕЗПЕЧНИХ ГАЗІВ	43
1.1. Аналіз національної нормативної бази щодо прогнозування зони хімічного забруднення при викиді небезпечних хімічних речовин...	43
1.2. Аналіз фізико-хімічних властивостей небезпечних газів.....	46
1.3. Аналіз особливостей розвитку та ліквідації надзвичайних ситуацій з викидом важких небезпечних газів.....	53
1.3.1. Аналіз відомих надзвичайних ситуацій техногенного характеру з викидом важких небезпечних газів.....	53
1.3.2. Організація ліквідації надзвичайних ситуацій техногенного характеру з викидом важких небезпечних газів.....	56
1.4. Відомі підходи до прогнозування зони хімічного забруднення при викиді важких небезпечних газів	61
Висновки до розділу 1.....	76
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ ОСАДЖЕННЯ ВАЖКИХ НЕБЕЗПЕЧНИХ ГАЗІВ ДРІБНОДИСПЕРСНИМ РІДИННИМ ПОТОКОМ	78
2.1. Модель сорбції важких небезпечних газів дрібнодисперсним потокком води.....	78
2.2. Математична модель прогнозування зони хімічного забруднення при викиді важких небезпечних газів	87
2.2.1. Математичний опис розповсюдження важких небезпечних газів за умов їх примусового осадження.....	87
2.2.2. Розробка методики чисельного розв'язання побудованих моделей.....	91

2.3. Кінетика хімічної нейтралізації дрібнодисперсним рідинним потоком важких небезпечних газів.....	96
2.3.1. Дослідження активності хімічної нейтралізації хлору при додаванні нейтралізаторів до дрібнодисперсного потоку води при осадженні.....	96
2.3.2. Моделювання та дослідження кінетики процесу нейтралізації хлору дрібнодисперсним потоком води з хімічним нейтралізатором..	100
2.3.3. Результати моделювання кінетики процесу нейтралізації хлору дрібнодисперсним потоком води з хімічним нейтралізатором.....	102
Висновки до розділу 2.....	106
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА МЕТОДУ ПРОГНОЗУВАННЯ ЗОНИ ХІМІЧНОГО ЗАБРУДНЕННЯ ПРИ ВИКИДІ ВАЖКИХ НЕБЕЗПЕЧНИХ ГАЗІВ	108
3.1. Розробка алгоритму реалізації методу прогнозування зони хімічного забруднення при викиді важких небезпечних газів.....	108
3.2. Перевірка працездатності методу прогнозування зони хімічного забруднення при викиді важких небезпечних газів	112
3.2.1. Розробка лабораторної установки та методики проведення досліджень процесу сорбції важких небезпечних газів дисперсними рідинними потоками.....	112
3.2.2. Експериментальна перевірка адекватності математичних моделей осадження важких небезпечних газів дисперсним потоком.....	117
3.2.3. Перевірка ефективності методу прогнозування зони хімічного забруднення при викиді важких небезпечних газів	123
3.3. Програмна реалізація методу нейтралізації важких небезпечних газів дрібнодисперсним рідинним потоком.....	129
Висновки до розділу 3.....	133
РОЗДІЛ 4. ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО ПРАКТИЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ МЕТОДУ ПРОГНОЗУВАННЯ ЗОНИ ХІМІЧНОГО ЗАБРУДНЕННЯ	

ПРИ ВИКИДІ ВАЖКИХ НЕБЕЗПЕЧНИХ ГАЗІВ	135
4.1. Розрахунок економічної ефективності запропонованого методу прогнозування зони хімічного забруднення при викиді важких небезпечних газів	135
4.2. Практичні рекомендації керівнику ліквідації надзвичайних ситуацій з викидом важких небезпечних газів.....	140
4.3. Рекомендації щодо переоблаштування стаціонарних систем осадження важких небезпечних газів.....	143
4.4. Особливості ліквідації надзвичайних ситуацій з викидом важких небезпечних газів під час воєнного стану.....	146
Висновки до розділу 4.....	149
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	151
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	154
ДОДАТОК А. Список публікацій за темою дисертації.....	167
ДОДАТОК Б. Акти впровадження результатів досліджень.....	173

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АРІНР – аварійно-рятувальні та інші невідкладні роботи;
АРР – аварійно-рятувальні роботи;
БПЛА – безпілотний літальний апарат;
ГДК – гранично допустима концентрація;
ГІС – геоінформаційна система;
ДСНС – Державна служба України з надзвичайних ситуацій;
ЄДСЦЗ – єдина державна система цивільного захисту;
ЄС – Європейський Союз;
ЗІЗ – засоби індивідуального захисту;
ЗСУ – Збройні Сили України;
КМУ – Кабінет Міністрів України;
МВС – Міністерство внутрішніх справ;
НС – надзвичайна ситуація;
НХР – небезпечна хімічна речовина;
НУЦЗУ – Національний університет цивільного захисту України;
ОРС ЦЗ – оперативно-рятувальна служба цивільного захисту;
ПНО – потенційно небезпечний об’єкт;
РХБЗ – радіаційний, хімічний та біологічний захист;
США – Сполучені Штати Америки;
ХНО – хімічно небезпечний об’єкт;
AERMOD – atmospheric dispersion modeling;
ALOHA – Areal Locations of Hazardous Atmospheres;
US EPA – United States Environmental Protection Agency.

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дисертаційного дослідження. Сьогодення вимагає використання великої кількості різноманітних хімічних речовин. Навіть за умов нормальної роботи обладнання у навколишнє середовище (повітря, вода та ґрунт) викидається велика кількість небезпечних хімічних речовин (НХР). Особливо масштабні викиди відбуваються у разі виникнення аварій. Надзвичайні ситуації (НС) з викидом НХР, як правило, характеризуються зонами ураження великих розмірів та значними екологічними наслідками. З метою забезпечення безпеки в зоні атмосферного забруднення з викидом НХР та прийняття правильного управлінського рішення по ліквідації НС, евакуації персоналу та населення важливим є проведення моніторингу та прогнозування розвитку НС [1]. Особливо важливим є прогнозування зони хімічного забруднення при виникненні НС з викидом газоподібних НХР, що швидко розповсюджуються у просторі.

24 лютого 2022 року розпочався відкритий воєнний напад російської федерації на Україну. Ризик виникнення аварій з викидом НХР суттєво збільшився. Є загроза як випадкового, так і навмисного руйнування ворогом об'єктів з обертанням НХР.

З воєнної точки зору деякі НХР є бойовими отрутними речовинами, або використовуються при виробництві бойових отрутних речовин (наприклад хлор використовується для виготовлення іприту та фосгену). Згідно інформації The Times [2] станом на 01 січня 2026 року з початку відкритого воєнного нападу російські війська застосовували небезпечні хімічні речовини понад 9000 разів. Значною мірою це стосувалося гранат, начинених газами для боротьби з масовими заворушеннями, такими як CS та CN. Вони призначені для того, щоб зробити людину недієздатною, але не вбити, проте також можуть завдати серйозної шкоди. Російські підрозділи також застосовують хлорпікрин, задушливий газ, який вперше застосували під час Першої світової війни.

Вважається, що щонайменше троє українських військових загинули від впливу хімічних речовин.

Для забезпечення необхідної точності розрахунку розмірів зон хімічного забруднення НХР необхідно враховувати параметри викиду (вид хімічної речовини, її фізико-хімічні властивості, температура, тиск зберігання, інтенсивність викиду тощо) та метеорологічні умови (температура та вологість повітря, атмосферний тиск, напрямок та швидкість вітру тощо) [3].

Найбільш вагомими науковими результатами в даній галузі отриманими в роботах вітчизняних та закордонних дослідників, зокрема: Басманов Олексій Євгенович [4], Кустов Максим Володимирович [5], Мельниченко Андрій Сергійович [6], Попов Олександр Олександрович [7], Crowley John (Німеччина) [8], Rosenfeld Daniel (Israel) [9], Shiraiwa Manabu (США) [10] та інших.

Відомі підходи до ліквідації наслідків НС з викидом в атмосферне повітря НХР, ґрунтуються, як правило, на створенні рідинних (зокрема, водяних) завіс за допомогою наявної спеціальної аварійно-рятувальної техніки. При цьому відбувається осадження НХР із атмосферного повітря дрібнодисперсним потоком чистої води або води з хімічними нейтралізаторами. Для забезпечення високої ефективності процесу осадження необхідно знати оптимальну інтенсивність подачі потоку рідини на осадження, хімічну активність рідини до небезпечної хімічної речовини, очікувану площу осадження тощо. Це суттєво ускладнює процес ліквідації наслідків НС та прогнозування можливого хімічного забруднення.

Таким чином, розробка методу прогнозування зони хімічного забруднення при викиді важких небезпечних газів є актуальною науково-практичною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано у науково-дослідній лабораторії радіаційного, хімічного та біологічного захисту (РХБЗ) Навчально-наукового інституту інженерної та спеціальної підготовки Національного університету цивільного захисту України (м. Черкаси) на виконання Стратегії [11] та з урахуванням

особливостей воєнного стану, введеним в Україні після відкритого воєнного нападу 24 лютого 2022 року російської федерації [12].

Тема дисертаційного дослідження відповідає пункту 25 Тематики наукових досліджень і науково-технічних (експериментальних) розробок на 2025-2029 роки, затвердженою наказом Міністерства внутрішніх справ України від 21 травня 2024 року № 326.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення точності визначення параметрів зон хімічного забруднення шляхом моделювання розповсюдження хмари викиду небезпечної хімічної речовини та її осадження водними струменями.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Провести аналіз існуючих підходів до прогнозування зони хімічного забруднення при викиді важких небезпечних газів.

2. Побудувати модель та дослідити з її допомогою інтенсивність осадження дрібнодисперсним рідинним потоком важких небезпечних газів.

3. Розробити метод прогнозування зони хімічного забруднення при викиді важких небезпечних газів та провести експериментальну перевірку його працездатності.

4. Розробити пропозиції щодо практичної реалізації методу прогнозування зони хімічного забруднення при викиді важких небезпечних газів.

Об'єкт дослідження. Процес формування зони хімічного забруднення при НС з викидом важких небезпечних газів.

Предмет дослідження. Параметри зони хімічного забруднення при НС з викидом важких небезпечних газів.

Методи дослідження. Для розв'язання поставлених наукових завдань в дисертаційній роботі використовувалися методи математичного моделювання, методи розв'язання оптимізаційних задач, методи вимірювання метеорологічних параметрів середовища, теорія планування експерименту, методи теорії імовірності та математичної статистики.

Наукова новизна одержаних результатів. У дисертаційній роботі розв'язано важливу науково-практичну задачу в галузі цивільного захисту – розроблено метод прогнозування зони хімічного забруднення при викиді важких небезпечних газів, що дозволить підвищити ефективність ліквідації таких НС внаслідок уточнення параметрів зон хімічного забруднення.

При виконанні дисертації отримано нові наукові результати:

1. *Вперше розроблено* математичну модель динаміки розповсюдження важких небезпечних газів з паралельним процесом їх осадження дисперсним рідинним потоком, яка створена шляхом розв'язання рівнянь Нав'є-Стокса з відповідними граничними умовами, включає рівняння сорбції газу поверхнею краплі, рівняння масопереносу небезпечного газу в об'ємі краплі, рівняння швидкості хімічної реакції між нейтралізатором та небезпечним газом в об'ємі краплі та дозволяє розраховувати концентраційний розподіл небезпечного газу у приповерхневому шарі атмосфери при відповідних метеорологічних умовах та викиді газу з різною інтенсивністю та його осадження.

2. *Вперше розроблено та програмно реалізовано* метод прогнозування зони хімічного забруднення при викиді важких небезпечних газів, який базується на математичній моделі динаміки розповсюдження важких небезпечних газів з паралельним процесом їх осадження дисперсним рідинним потоком та який, на відміну від існуючих, враховує особливості воєнного періоду та функціонує на основі трьох ключових блоків – моніторинг зони аварії з контролем стану загроз обстрілу, прогнозування наслідків при застосуванні активної нейтралізації та осадження небезпечного газу та прийняття управлінського рішення з урахуванням небезпек повторного обстрілу та маскування зон деконтамінації.

3. *Створено* удосконалену експериментальну лабораторну установку для дослідження процесів сорбції важких небезпечних газів, яка являє собою камеру, що обладнана форсунками для впорскування важких небезпечних газів, форсунками для впорскування води та датчиків газоаналізатору, що спроможні переміщуватися по вертикалі та яка дозволяє досліджувати кінетику сорбції

небезпечних газів дисперсними потоками, кінетику їх нейтралізації та розповсюдження по поверхні різного кута нахилу (конструкція захищена патентом України на корисну модель №159622).

Практичне значення отриманих результатів полягає в розробці нового методу прогнозування зони хімічного забруднення при викиді важких небезпечних газів в атмосферу. Для цього побудовано математичну модель дифузійного розповсюдження в атмосфері важких небезпечних газів (газоподібних НХР із густиною більшою за атмосферне повітря) за умови паралельного протікання процесу їх примусового осадження дрібнодисперсним потоком рідини (чистої води або з домішками хімічних нейтралізаторів).

На основі розробленого методу запропоновано методика прогнозування зони хімічного забруднення при викиді важких небезпечних газів, яка може бути використана підрозділами оперативно-рятувальної служби цивільного захисту (ОРС ЦЗ) при ліквідації НС, організації безпечної роботи рятувальників та для організації безпечної евакуації персоналу підприємств та населення з небезпечних зон. Також методика прогнозування є корисною для Департаментів цивільного захисту територіальних органів державної влади при розробці та корегуванні планів реагування на НС на хімічно небезпечних об'єктах (ХНО) на підконтрольних територіях.

Основні наукові результати дисертаційної роботи доведено до рівня конкретних алгоритмів дій та практичних рекомендацій. Отримані в дисертації результати можуть бути використані для моніторингу обстановки в зоні НС з викидом важких небезпечних газів та оптимізації роботи керівника ліквідації НС.

Результати дисертаційної роботи впроваджені в наступному:

1. Метод прогнозування зони хімічного забруднення при викиді важких небезпечних газів, алгоритм нейтралізації дрібнодисперсним рідинним потоком важких небезпечних газів, пропозиції щодо практичної реалізації методики прогнозування зони хімічного забруднення при викиді важких небезпечних газів впроваджено в практичну діяльність аварійно-рятувального

загону спеціального призначення Головного управління Державної служби України з надзвичайних ситуацій у Харківській області при організації аварійно-рятувальних робіт на хімічно-небезпечних об'єктах, де знаходяться важкі небезпечні гази (зокрема, хлор) з метою мінімізації наслідків надзвичайних ситуацій (Акт впровадження від 27.11.2025).

2. Алгоритм нейтралізації дрібнодисперсним рідинним потоком важких небезпечних газів, метод прогнозування зони хімічного забруднення при викиді важких небезпечних газів, пропозиції щодо практичної реалізації методики прогнозування зони хімічного забруднення при викиді важких небезпечних газів впроваджено в практичну діяльність підрозділу радіаційного, хімічного, біологічного захисту військової частини А0998 при проведенні РХБ-розвідки, виявленні, контролю і оцінці рівня хімічної загрози на територіях дій підрозділу (Акт впровадження від 12.12.2025).

3. Метод прогнозування зони хімічного забруднення при викиді важких небезпечних газів та алгоритм нейтралізації дрібнодисперсним рідинним потоком важких небезпечних газів впроваджено у навчально-виховний процес Національного університету цивільного захисту України (м. Черкаси) при викладанні теми 1.10. Характеристика аварій з виливом (викидом) небезпечних хімічних речовин на промислових об'єктах і транспорті (Модуль 1. Радіаційний і хімічний захист населення і територій. Біологічний захист населення) обов'язкової професійної навчальної дисципліни «Радіаційний, хімічний та біологічний захист» за освітньо-професійною програмою «Цивільний захист» підготовки першого (бакалаврського) рівня вищої освіти у галузі знань К «Безпека та оборона» за спеціальністю К10 «Цивільна безпека» (Акт впровадження від 18.11.2025).

Особистий внесок здобувача. Основні положення та результати дисертаційного дослідження отримані автором особисто і наведені в роботах [13-32]. Роботи [15, 19, 29] підготовлено без співавторів. В наукових роботах, що опубліковані у співавторстві, особисто здобувачу належать: в роботі [13] – огляд існуючих алгоритмів прогнозування інтенсивності сорбції хімічно-

небезпечних газоподібних матеріалів, програмна реалізація та практична апробація запропонованого алгоритму прогнозування інтенсивності сорбції небезпечних газоподібних матеріалів; в роботі [14] – дослідження інтенсивності нейтралізації важких небезпечних газів дрібнодисперсною водою та отримання висновку, що при осадженні небезпечних газів у дрібнодисперсному потоці води визначальним параметром є константа Генрі небезпечного газу, а не інтенсивність подачі дрібнодисперсного потоку води; в роботі [16] – аналіз літературних джерел, проведення розрахунків за побудованою моделлю примусового осадження важких небезпечних газів; також здобувач прийняв участь у аналітичному розв’язанні рівнянь Нав’є-Стокса з відповідними граничними умовами; в роботі [17] – аналіз літературних джерел, проведення розрахунків за побудованою моделлю нейтралізації хлору дрібнодисперсним потоком води з хімічним нейтралізатором; також здобувач прийняв участь у побудові математичної моделі з використанням стандартного рівняння хімічної кінетики; в роботі [18] – аналіз літературних джерел та ідея створення камери для дослідження процесу сорбції важких газів, яка містить циліндричний корпус, вентилятор, рідинні запірні крани, форсунки для впорскування води, газоаналізатор з блоком індикації, форсунку для впорскування газу, газовий запірний кран, опори, вихідний газо-повітряний отвір, зливні патрубки, пересувні датчики, вимірювач концентрації розчинених у воді активних важких газів із зливним патрубком для безпечного відведення рідини; в роботі [20] – огляд існуючих алгоритмів прогнозування інтенсивності сорбції хімічно-небезпечних газоподібних матеріалів, програмна реалізація та практична апробація запропонованого алгоритму прогнозування інтенсивності сорбції небезпечних газоподібних матеріалів; в роботі [21] – аналіз аварій з викидом НХР хлор, аналіз небезпечних властивостей хлору та способів його нейтралізації при аварійному викиді; в роботі [22] – аналіз аварій з викидом НХР хлор, аналіз небезпечних властивостей хлору та способів його нейтралізації при бойовому застосування; в роботі [23] – пропозиції оперативних заходів реагування на НС, пов’язані з викидом хлору в умовах

відкритого воєнного нападу на Україну; в роботі [24] – аналіз аварій з викидом НХР хлор, аналіз небезпечних властивостей хлору та способів його нейтралізації при аварійному викиді в умовах відкритого воєнного нападу на Україну; в роботі [25] – аналіз літературних джерел, проведення розрахунків за побудованою моделлю примусового осадження важких небезпечних газів; також здобувач прийняв участь у аналітичному розв’язанні рівнянь Нав’є-Стокса з відповідними граничними умовами; в роботі [26] – математичний опис процесу сорбції важкого небезпечного газу (газу, що має густину більше 0,8 відносно до густини повітря) дрібнодисперсним водним потоком; в роботі [27] – отримання залежностей інтенсивності осадження небезпечних газів від інтенсивності подачі дисперсного потоку для аміаку, соляної кислоти, фосгену, синильної кислоти, діоксиду сірки та хлору; в роботі [28] – доказ, що нейтралізація з використанням водних потоків має найбільшу інтенсивність для хімічно небезпечних газоподібних матеріалів, що легко розчинюється у воді, а інтенсивність нейтралізації хімічно небезпечних газоподібних матеріалів, що погано розчинюється у воді є меншою; в роботі [30] – доказ, що збільшення інтенсивності подачі дрібнодисперсного потоку чистої води при осадженні хлору з атмосфери не дозволяє досягти навіть середніх показників інтенсивності дегазації у порівнянні з іншими небезпечними газоподібними речовинами. Здобувачем особисто доведено, що для збільшення інтенсивності дегазації хлору до води слід додавати хімічно-активні речовини, зокрема сполуки лужних металів натрію, калію та кальцію (гідроксид натрію (NaOH), гідроксид калію (KOH), карбонат натрію (Na₂CO₃), гідроксид кальцію (Ca(OH)₂), сульфат натрію (Na₂SO₃), тіосульфат натрію (Na₂S₂O₃)); в роботі [31] – дослідження інтенсивності нейтралізації небезпечних газів, що є як легшими так і важчими відносно повітря, при їх осадженні дрібнодисперсною водою; в роботі [32] – проведення розрахунків за побудованою моделлю нейтралізації хлору дрібнодисперсним потоком води з хімічним нейтралізатором; також здобувач прийняв участь у побудові математичної моделі з використанням стандартного рівняння хімічної кінетики.

Апробація результатів дисертаційного дослідження. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на:

- Міжнародній науково-практичній конференції молодих учених «Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту» (м. Харків, НУЦЗУ, 25-26.04.2024 р., форма участі – дистанційна);
- Міжнародній науково-практичній конференції «Problems of emergency situations» (м. Харків, НУЦЗУ, 16.05.2024 р., форма участі – дистанційна);
- IV Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції з нагоди відзначення Дня науки-2024 в Україні «Актуальність та особливості наукових досліджень в умовах воєнного стану» (м. Київ, Державний науково-дослідний інститут МВС України, 22.05.2024 р., форма участі – дистанційна);
- Міжнародній науково-практичній конференції «СБУ в умовах військової агресії: сучасні реалії та інноваційні стратегії забезпечення національної безпеки» (м. Київ, Інститут Служби Безпеки України Національного юридичного університету імені Ярослава Мудрого, 4-5.07.2024 р., форма участі – дистанційна);
- Круглому столі «Об'єднання теорії та практики – запорука підвищення готовності оперативно-рятувальних підрозділів до виконання дій за призначенням» (м. Харків, НУЦЗУ, 22.11.2024 р., форма участі – дистанційна);
- XVI Міжнародній науково-методичній конференції, Міжнародної науковій конференції Європейської Асоціації наук з безпеки (EAS) "Безпека людини у сучасних умовах" (м. Харків, Національний технічний університет «Харківській політехнічний інститут», 6-7 грудня 2024 р., форма участі – дистанційна);
- Міжнародній науково-практичній конференції “Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення” (м. Львів, Львівській державний університет безпеки життєдіяльності, 13.12.2024 р., форма участі – дистанційна);

- Круглому столі (вебінарі) «Запобігання виникненню надзвичайних ситуацій, реагування та ліквідація їх наслідків» (м. Черкаси, НУЦЗУ, 28.02.2025 р., форма участі – дистанційна);
- II-й Міжнародній науково-практичній конференції «Актуальні проблеми діяльності складових сектору безпеки і оборони України в умовах особливих правових режимів: поточний стан та шляхи вирішення». (м. Харків, Національна академія Національної гвардії України, 20.03.2025 р., форма участі – дистанційна);
- Міжнародній науково-практичній конференції молодих учених «Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту» (м. Черкаси, НУЦЗУ, 16-18.04.2025 р., форма участі – дистанційна);
- I-й Міжнародній науково-практичній конференції «Цивільний захист в умовах війни» (м. Львів, Львівській державний університет безпеки життєдіяльності, 17-18.04.2025 р., форма участі – дистанційна);
- Міжнародній науково-практичній конференції «Problems of emergency situations» (м. Харків, НУЦЗУ, 14.05.2025 р., форма участі – дистанційна);
- XV Міжнародній науково-методичній конференції, Міжнародної науковій конференції Європейської Асоціації наук з безпеки (EAS) "Безпека людини у сучасних умовах" (м. Харків, Національний технічний університет «Харківській політехнічний інститут», 4-5 грудня 2025 р., форма участі – дистанційна).

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 20 наукових праць: 2 статті у закордонних наукових фахових виданнях, проіндексованих у базі даних Scopus; 3 статті (з яких 1 стаття підготовлена особисто) у наукових фахових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України; 14 тез доповідей на конференціях; один патент на корисну модель, виданий в Україні.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота загальним об'ємом 177 сторінок складається з анотації, змісту, переліку умовних позначень, вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел зі 122 найменування і 2-х додатків, містить 15 рисунків та 14 таблиць.

РОЗДІЛ 1.

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ПІДХОДІВ ДО ПРОГНОЗУВАННЯ ЗОНИ ХІМІЧНОГО ЗАБРУДНЕННЯ ПРИ ВИКИДІ ВАЖКИХ НЕБЕЗПЕЧНИХ ГАЗІВ

В даному розділі проведений аналіз національної нормативної бази України щодо прогнозування зони хімічного забруднення при викиді НХР. Встановлено, що питання прогнозування наслідків викиду НХР під час аварій, організації гасіння пожеж, ліквідації аварії та захисту особового складу підрозділів ОРС ЦЗ було актуальним з початку отримання Україною незалежності.

Проведений аналіз фізико-хімічних властивостей деяких найбільш часто застосовуваних небезпечних газів: аміак, діоксид сірки, дихлорангідрид вугільної кислоти (фосген), синильна кислота (ціанід водню), соляна кислота, хлор. В процесі аналізу з'ясовано, що важчими відносно повітря є наступні небезпечні гази: діоксид сірки, дихлорангідрид вугільної кислоти (фосген), соляна кислота, хлор.

Проаналізовано відомі НС техногенного характеру з викидом важких небезпечних газів, що трапилися у світі, порядок організації в Україні ліквідації НС техногенного характеру з викидом важких небезпечних газів та діючі національні та відомі закордонні алгоритми прогнозування розвитку НС з викидом важких небезпечних газів.

Матеріали розділу викладено в роботах автора [15-17, 21, 24].

1.1. Аналіз національної нормативної бази щодо прогнозування зони хімічного забруднення при викиді небезпечних хімічних речовин

Питання прогнозування наслідків викиду НХР під час аварій, організації гасіння пожеж, ліквідації аварій та захисту особового складу підрозділів ОРС ЦЗ було актуальним з початку отримання Україною незалежності [33-42]. 08

травня 1997 року було введено рекомендації з захисту особового складу під час гасіння пожеж, що пов'язані з наявністю аміаку [33], 18 січня 2001 року – рекомендації щодо захисту особового складу підрозділів пожежної охорони під час гасіння пожеж з наявністю хлору [34], 27 березня 2001 року – методика прогнозування наслідків розливу (викиду) хімічно небезпечних речовин при аваріях на промислових об'єктах і транспорті [35], 19 лютого 2004 року – рекомендації щодо захисту особового складу підрозділів пожежної охорони під час гасіння пожеж з наявністю мінеральних кислот (соляної, сірчаної, азотної, фосфорної тощо) [36].

На сьогодні нормативно-правова база України, що регулює ліквідацію наслідків НС з викидом НХР, є всеохоплюючою та ґрунтується на принципах цивільного захисту. Цей законодавчий масив складається із законів, постанов Кабінету Міністрів України (КМУ) та відомчих наказів. Основним документом, який визначає правові та організаційні засади в цій сфері, є Кодекс цивільного захисту України [39]. Він не лише регулює відносини, пов'язані з запобіганням виникненню хімічних НС та реагуванням на них, але й чітко окреслює механізми ліквідації їхніх наслідків. Кодекс встановлює повноваження усіх учасників процесу – від центральних органів державної влади до суб'єктів господарювання та громадян, а також закріплює створення та функціонування ЄДС ЦЗ.

Наступний рівень регулювання представлений підзаконними актами, які забезпечують практичну реалізацію норм Кодексу, перетворюючи загальні положення на конкретні механізми дій. Визначальною є Постанова КМУ від 09.01.2014 № 11, яка затверджує Положення про ЄДС ЦЗ [43], докладно описуючи її структуру, рівні управління та режими функціонування (зокрема, режим НС). Крім того, ключову роль у забезпеченні готовності до реагування відіграє Постанова КМУ від 30.09.2015 № 775, що регламентує порядок створення та використання матеріальних резервів [44]. Ці резерви є життєво необхідними для швидкого реагування, оскільки вони містять засоби індивідуального захисту (ЗІЗ), необхідне обладнання для локалізації джерел

хімічного забруднення та речовини для проведення дегазації. Для координації дій на державному рівні, особливо під час масштабних хімічних аварій, уряд керується Постановою КМУ від 14.06.2002 № 843, яка регулює створення та діяльність спеціальних Урядових комісій з ліквідації наслідків НС [45]. Фінансове забезпечення усіх робіт із запобігання та ліквідації хімічних НС, включаючи компенсаційні виплати, здійснюється відповідно до Постанови КМУ від 04.02.1999 № 140 [46].

Для оперативної діяльності та безпосередньої ліквідації наслідків хімічних аварій найважливішими є відомчі нормативні документи, які розробляються Міністерством внутрішніх справ (МВС) та Державною службою України з надзвичайних ситуацій (ДСНС). Центральне місце серед них посідає Наказ МВС України від 29.11.2019 № 1000, яким затверджено Методику прогнозування наслідків вилливу (викиду) небезпечних хімічних речовин під час аварій [42]. Ця Методика є інструментом для швидкої та точної оцінки хімічної обстановки: вона дозволяє прогнозувати розміри зон можливого хімічного забруднення, швидкість поширення отруйної хмари та потенційну кількість постраждалих. На основі цих прогнозів органи управління цивільного захисту приймають рішення про необхідність евакуації населення, визначають маршрути руху рятувальних сил та обирають тактику застосування засобів захисту. Крім цього, детальні Статути дій органів управління та підрозділів ОРС ЦЗ [40, 41], затверджені відповідними наказами ДСНС України, чітко регламентують тактику та алгоритми проведення аварійно-рятувальних та інших невідкладних робіт (АРІНР). Статути охоплюють увесь комплекс дій: від проведення хімічної розвідки, ідентифікації НХР та локалізації джерела викиду до проведення деконтамінації місцевості, техніки та людей, а також надання першої медичної допомоги постраждалим. Спеціалізовані аварії, такі як інциденти під час транспортування НХР, регулюються окремими галузевими правилами, наприклад, Наказом Міністерства транспорту України від 16.10.2000 № 567 щодо перевезення небезпечних вантажів залізничним транспортом [47].

Захист особового складу підрозділів ОРС ЦЗ під час гасіння пожеж та ліквідації наслідків аварій за наявності НХР (аміак, хлор, азотна, сірчана, соляна та фосфорна кислоти) здійснюється згідно вимог [37, 48], організація гасіння пожеж на промислових об'єктах підвищеної небезпеки з наявністю НХР – [38, 40].

Таким чином, нормативна база України забезпечує як стратегічне управління системою цивільного захисту, так і конкретний, методичний підхід до ліквідації найскладніших хімічних НС. Нормативна база України є структурованою та достатньою для регулювання процесів запобігання, реагування та ліквідації хімічних НС, поєднуючи стратегічне управління з детальними інструкціями для практичного застосування на місцях. Аналіз нормативної бази України демонструє, що система ліквідації наслідків НС з викидом НХР має комплексний, багаторівневий та взаємопов'язаний характер.

1.2. Аналіз фізико-хімічних властивостей небезпечних газів

Повітря – це суміш газів, де азот N_2 становить приблизно 78,09 %, кисень O_2 – 20,95 %, аргон Ar – 0,93 %, вуглекислий газ CO_2 – 0,03 % та незначна кількість інших газів [49]. Молярна маса азоту N становить 14,006 г/моль, кисню O – 15,999 г/моль, аргону Ar O – 39,948 г/моль, вуглецю C – 12,011 г/моль [50]. Щоб отримати середню молярну масу повітря, необхідно врахувати пропорції кожного газу в суміші:

$$M_{\text{повітря}} = 0,7809 \cdot 2 \cdot 14,006 + 0,2095 \cdot 2 \cdot 15,999 + 0,0093 \cdot 39,948 + \\ + 0,0003 \cdot (12,011 + 2 \cdot 15,999) \approx 29,0 \text{ г / моль} . \quad (1.1)$$

Середня молярна маса повітря дорівнює 29,0 г/моль. Таким чином, гази будуть важчі за повітря якщо мають молярну маса більше 29,0 г/моль. Гази є легшими за повітря якщо мають молярну масу менше 29,0 г/моль.

У промисловості обертається у значних кількостях широке коло хімічно небезпечних газів [51]. Проаналізуємо фізико-хімічні властивості деяких найбільш часто застосовуваних небезпечних газів: аміак, діоксид сірки, дихлорангідрид вугільної кислоти (фосген), синильна кислота (ціанід водню), соляна кислота, хлор. В процесі аналізу з'ясуємо, які з перелічених газів є важчими відносно повітря.

Аміак – хімічна формула NH_3 [52]. Молярна маса азоту N становить 14,006 г/моль, водню H – 1,008 г/моль [49]. Молярна маса NH_3 :

$$M_{\text{NH}_3} = 14,006 + 3 \cdot 1,008 = 17,03 \text{ г/моль} < 29,0 \text{ г/моль} . \quad (1.2)$$

Тому аміак – газ, що є легшим за повітря.

Аміак за звичайних умов безбарвний газ із різким задушливим запахом. Використовується у промисловості для виробництва вибухових речовин, азотних добрив, азотної кислоти тощо. Є хладагентом у промислових холодильниках. Відмінно розчинюється у воді (при 20 °C і звичайному тиску в 1 об'ємі води розчиняється близько 700 об'ємів аміаку).

Діоксид сірки – хімічна формула SO_2 [53]. Молярна маса сірки S становить 32,060 г/моль, кисню O – 15,999 г/моль [50]. Молярна маса SO_2 :

$$M_{\text{SO}_2} = 32,060 + 2 \cdot 15,999 = 64,058 \text{ г/моль} > 29,0 \text{ г/моль} . \quad (1.3)$$

Тому діоксид сірки є важким газом відносно повітря.

Діоксид сірки за звичайних умов безбарвний газ з різким задушливим запахом.

Діоксид сірки використовується для синтезу сульфатної кислоти, як відбілювач та для боротьби зі шкідниками. Відносно добре розчинюється у воді (при температурі 20°C розчинність у воді складає 11,58 г/100 мл).

Дихлорангідрид вугільної кислоти або фосген – хімічна формула COCl_2 [54]. Молярна маса вуглецю С становить 12,011 г/моль, кисню О – 15,999 г/моль, хлору Cl – 35,453 г/моль [50]. Молярна маса COCl_2 :

$$M_{\text{COCl}_2} = 12,011 + 15,999 + 2 \cdot 35,453 = 98,916 \text{ г/моль} > 29,0 \text{ г/моль} . \quad (1.4)$$

Тому дихлорангідрид вугільної кислоти (фосген) є важким газом відносно повітря.

Дихлорангідрид вугільної кислоти або фосген за звичайних умов є безбарвною газоподібною речовиною із запахом прілих фруктів. Бойова отрутна речовина (застосовувався під час Першої Світової війни Німеччиною, у 1935 році – Італією, у 1937-1945 роках – Японією). Антидоту не існує.

Дихлорангідрид вугільної кислоти (фосген) використовується у промисловості при виробництві пластмас, барвників, пестицидів тощо. Розкладається при контакті з водою.

Синильна кислота або ціанід водню – хімічна формула HCN [55]. Молярна маса водню Н становить 1,008 г/моль, вуглецю С – 12,011 г/моль, азоту N – 14,006 г/моль [50]. Молярна маса HCN :

$$M_{\text{HCN}} = 1,008 + 12,011 + 14,006 = 27,028 \text{ г/моль} < 29,0 \text{ г/моль} . \quad (1.5)$$

Тому пари синильної кислоти (ціаніду водню) є легшими відносно повітря.

Синильна кислота або ціанід водню за звичайних умов безбарвна, прозора, дуже летка рідина. Пари мають п'янкий запах гіркою мигдалю. Високо токсична. Використовується у сільському господарстві для боротьби зі шкідниками, для знезаражування транспорту. В середовищі з ціанідом водню спостерігається прискорене досягання овочів та фруктів. З водою змішується у довільних пропорціях.

Пари соляної кислоти (розчину хлороводню у воді) – хімічна формула HCl [56]. Молярна маса водню H становить 1,008 г/моль, хлору Cl –35,453 г/моль [50]. Молярна маса HCl :

$$M_{\text{HCl}} = 1,008 + 35,453 = 36,461 \text{ г/моль} > 29,0 \text{ г/моль} . \quad (1.6)$$

Тому пари соляної кислоти є важкими відносно повітря.

Соляна кислота (розчин хлороводню у воді) за звичайних умов безбарвна, прозора рідина (технічна соляна кислота може мати жовтуватий відтінок через домішки). За своєю хімічною активністю є найсильнішою кислотою. Концентрована кислота містить 37-38% HCl. Пари соляної кислоти – це хмари газоподібного хлороводню, які виділяються з концентрованого розчину соляної кислоти за нормальної температури. Пар має різкий запах, є їдким і небезпечним для дихальних шляхів та слизових оболонок, викликаючи подразнення та опіки. Він утворюється через леткість хлороводню, який є складовою частиною соляної кислоти. Гранично допустима концентрація (ГДК) робочої зони ГДКр.з. – 5 мг/м³ [37]. Вологий хлороводень роз’їдає гуму. Водорозчинна, реагує з водою з виділенням тепла. Корозійна для більшості металів.

Соляна кислота широко використовується у промисловості для виготовлення солей, барвників, ліків тощо. Добре розчинюється у воді.

Для розсіювання (осадження) парів використовують розпилену воду. Місце розливу ізолювати піском, промити водою і не допускати потрапляння речовини в поверхневі води. Розливи засипати порошками, які містять лужний компонент (вапняк, доломіт, сода). Нейтралізація каустичною содою може призвести до вибуху. Орієнтовні норми витрат для нейтралізації територій складають: сухих речовин - 0,5÷1 кг/м², водних розчинів - 1÷2 л/м².

Хлор – хімічна формула Cl₂ [57]. Молярна маса хлору Cl становить 35,453 г/моль [50]. Молярна маса Cl₂ :

$$M_{\text{Cl}_2} = 2 \cdot 35,453 = 70,906 \text{ г / моль} > 29,0 \text{ г / моль} . \quad (1.7)$$

Тому хлор є важким газом відносно повітря.

Хлор блідно-жовто-зелений газ з характерним запахом (сприймання запаху відбувається при концентрації в межах $0,3 \div 3,8 \text{ мг/м}^3$, безпечною максимально припустимою є концентрація 5 мг/м^3). ГДКр.з. – 1 мг/м^3 .

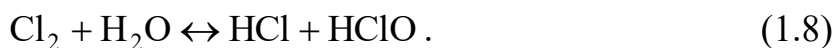
Газоподібний хлор значно важчий за повітря, тому має властивість накопичуватися у низьких ділянках місцевості, підвалах тощо. Зріджується при температурі мінус $34 \text{ }^\circ\text{C}$. Випаровуючись у повітрі рідкий хлор утворює з водяними парами білий туман. Хлор у хмарі знаходиться у смертельних концентраціях. Хлор належить до сильних окисників. Вологий хлор спричиняє сильну корозію більшості металів. Наявність хлору в повітрі призводить до зупинки двигунів внутрішнього згоряння та їх пошкодження [34, 37, 57, 58].

Хлор є сильнодіючою отруйною речовиною, яка має загально-токсичну й подразнюючу дію на організм людини, а також викликає хімічні опіки. Перші ознаки ураження – різкий грудний біль, порушення координації руху, різь в очах, слизотеча, сухий кашель, блювання. Хлор спричинює різке подразнення слизових оболонок очей, верхніх і глибоких дихальних шляхів і легенів.

З точки зору пожежної небезпеки є негорючою речовиною. Є окисником. Багато металів та неметалів (титан, мідь, алюміній, цинк, фосфор тощо) спроможні горіти в атмосфері сухого і вологого газу хлор.

Хлор зберігається в спеціальних резервуарах або закачується в сталеві балони високого тиску. Балони з рідким хлором під тиском мають спеціальне фарбування – захисний колір із зеленою смугою. Під час тривалої експлуатації балонів із хлором у них накопичується надзвичайно вибуховий трихлорид азоту, і тому час від часу балони з хлором мають проходити планову промивку й очищення від хлориду азоту.

Хлор розчинюється у воді з утворенням соляної кислоти HCl та хлорноватистої кислоти HClO :



За своєю хімічною активністю соляна кислота HCl належить до найсильніших кислот. Властивості соляної кислоти суттєво залежать від її концентрації у водному розчині. Концентрована соляна кислота містить 37% HCl і має густину $1,19 \text{ г/см}^3$. Соляна кислота у концентрації близько 0,5 % присутня у шлунку людини. Хлорнуватиста кислота HClO за своєю хімічною активністю є слабкою кислотою. Використовується як дезінфікуючий засіб.

При $10 \text{ }^\circ\text{C}$ і атмосферному тиску один літр води розчиняє $3,10 \text{ л}$ газоподібного хлору, а при $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 1 л води розчиняє лише $1,77 \text{ л}$ хлору. Зі збільшенням рН розчину (зі збільшенням лужності) розчинність хлору у воді збільшується.

Для збільшення інтенсивності дегазації хлору до води додаються хімічно-активні речовини, зокрема сполуки лужних металів натрію, калію та кальцію (гідроксид натрію (NaOH), гідроксид калію (KOH), карбонат натрію (Na_2CO_3), гідроксид кальцію ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), сульфат натрію (Na_2SO_3), тіосульфат натрію ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$)) [37]. При цьому відбуваються наступні хімічні реакції.

Для водного розчину гідроксиду натрію:



Гіпохлорит натрію NaClO розкладається з утворенням хлориду натрію та кисню:



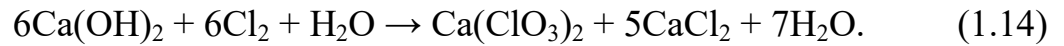
Для водного розчину гідроксиду калію:



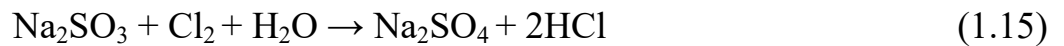
Для водного розчину карбонату натрію:



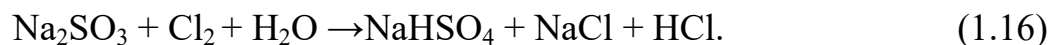
Для водного розчину гідроксиду кальцію:



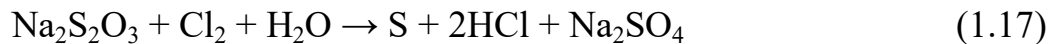
Для водного розчину сульфіту натрію:



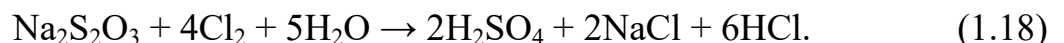
або



Для водного розчину тіосульфату натрію:



або



З проаналізованих в параграфі хімічно небезпечних газів легшими відносно повітря є:

- аміак NH_3 , молярна маса $M_{\text{NH}_3} = 17,03$ г/моль, повітря є важчим ніж аміак у 1,7 рази;

- пари синильної кислоти (ціаніду водню) HCN , молярна маса $M_{\text{HCN}} = 27,028$ г/моль, повітря є важчим ніж пари синильної кислоти (ціаніду водню) у 1,07 рази.

З проаналізованих в параграфі хімічно небезпечних газів важчими

відносно повітря є хімічно небезпечні газ:

- пари соляної кислоти HCl , молярна маса $M_{\text{HCl}} = 36,461 \text{ г/моль}$, пари є важчими відносно повітря у 1,2 рази;

- діоксид сірки SO_2 , молярна маса $M_{\text{SO}_2} = 64,058 \text{ г/моль}$, газ є важчим відносно повітря у 2,2 рази;

- хлор Cl_2 , молярна маса $M_{\text{Cl}_2} = 70,906 \text{ г/моль}$, газ є важчим відносно повітря у 2,4 рази;

- дихлорангідрид вугільної кислоти (фосген) COCl_2 , молярна маса $M_{\text{COCl}_2} = 98,916 \text{ г/моль}$, газ є важчим відносно повітря у 3,4 рази.

Хімічно небезпечні газ, що є важчими відносно за повітря, становлять значну небезпеку через їхнє можливе скупчення в низинах. Їхня висока відносна густина сприяє повільному розсіюванню та формуванню стійких осередків зараження приземного шару.

1.3. Аналіз особливостей розвитку та ліквідації надзвичайних ситуацій з викидом важких небезпечних газів

1.3.1. Аналіз відомих надзвичайних ситуацій техногенного характеру з викидом важких небезпечних газів

На території України розташовано понад 1800 об'єктів, на яких обертаються НХР [59]. У зонах можливого хімічного зараження від хімічно-небезпечних об'єктів (ХНО) мешкає близько 20 млн. осіб (42% населення країни). Україна є найбільш критичним регіоном Європи з хімічно-небезпечного навантаження, що майже у 5 разів перевищує середньоєвропейський рівень. Найбільша кількість ХНО в Україні розташована на території Донецької, Дніпропетровської, Запорізької, Харківської та Львівської областей [60].

Досить широке застосування у промисловості та у побуті знайшов важкий небезпечний газ хлор. На ХНО в Україні зберігається понад 3 тис. т хлору [61].

Хлор є сировиною для виробництва полівінілхлориду, пластмас, з яких виготовляють ізоляцію для кабельних виробів, віконний профіль, пакувальні та будівельні матеріали тощо. Використовується при виробництві інсектицидів (зокрема, гексахлорану) для боротьби зі шкідниками у сільському господарстві. Хлорування є найбільш розповсюдженим способом промислового знезаражування питної води (ґрунтується на спроможності хлору пригнічувати ферментні системи мікроорганізмів). Для питної води допустимим є вміст остаточного хлору у питній воді $0,3 \div 0,5$ мг/л.

Наприклад, на території Харківської області розташовано 103 стаціонарних ХНО усіх 4-ох ступенів хімічної небезпеки згідно [62], на яких зберігається та використовується в процесі виробництва близько 21,256 тис. т НХР [63]. В Харківській області на ХНО зберігається понад 1000 тонн хлору. Найнебезпечнішим у Харківській області до останнього часу було державне підприємство “Хімпром” (м. Златопіль (Першотравневе)), на якому обертався хлор [64]. Будівництво хімічного заводу було почато у 1964 році. Станом на 2019 рік будівлі цехів підірвані. Згідно екологічного паспорту Харківської області [63] найбільш небезпечними підприємствами є комплекси «Харківводовідведення» (Диканівські очисні споруди та Безлюдівські очисні споруди), склад хлору, станція по підготовці води для м. Харків, комплекс водопідготовки «Донець» (с. Кочеток Чугуївський район).

Черкаська область має об'єкти усіх 4-ох ступенів хімічної небезпеки згідно [62]. ХНО розташовані у місті Черкаси та в 18 містах та районах області [65]. Всього ХНО – 32, із яких I ступеня небезпеки – 3, II ступеня – 10, III ступеня – 7, IV – ступеня 12. На даних об'єктах зберігається 11450 тон НХР, із яких хлор – 45 тон, аміак – 11140 тон, інші – 260 тон. Кількість населення, що проживає у зоні можливого хімічного забруднення становить 582650 осіб. Найбільшим підприємством, що працює з хлором, є ТОВ "Хлор Плюс", що зареєстроване за адресою: м. Черкаси, вулиця Надпільна, будинок 55 [66].

Широке застосування хлору обумовлює відносно часте виникнення аварій з його викидом.

У серпні 1991 року в Мексиці під час залізничної катастрофи з рейок зійшли 32 цистерни з рідким хлором. В атмосферу було викинуто близько 300 тонн хлору. У зоні поширення зараженого повітря отримали ураження різного ступеня тяжкості близько 500 осіб, з них 17 людей загинули на місці. З найближчих населених пунктів було евакуйовані понад тисячу жителів [67].

10 липня 2006 року у Китаї на півночі країни в результаті витоку хлору на хімзаводі було шпиталізовано 164 людини. Інцидент стався на хімічному заводі Синерте в повіті Інчуань Нінся-Хуейського автономного району. До ранку понеділка (10.07) витік ліквідували [68].

24 жовтня 2010 року на складі хлору Деснянської водопровідної станції ВАТ «АК «Київводоканал» стався викид хлору у приміщенні танків хлору [69]. НС сталася при зливі хлору з цистерни через відключення одного із двох компресорів.

03 вересня 2018 року в Довгінцевському районі міста Кривий Ріг на території підприємства «Кривбасводоканал» виникла масштабна аварія з витоком хлору [70]. Під час переливання рідкого хлору з танка ємністю 96 м^3 у транспортувальну ємність об'ємом $0,8 \text{ м}^3$ на засувці між танком і ємністю не витримав ущільнювач, що спричинило витік 25-30 кг хлору. Вплив хлору на організм людини відчувався на відстані декількох кілометрів від місця аварії.

28 лютого 2019 року у штаті Алабама (США) стався витік хлору на підприємстві з водопостачання Birmingham Water Works, госпіталізовані понад 50 осіб [71]. Причиною витоку в Birmingham Water Works називають випадкове змішування натрію гіпохлориту (відбілювач) і сульфату заліза.

01 грудня 2021 року в Одесі на території підприємства стався витік хлору внаслідок розгерметизації ємності об'ємом 800 літрів [72]. Для локалізації аварії було подано воду розпиленими струменями для осадження парів хлору. Рятувальники наклали бандаж на ємність, що розгерметизувалася.

24 лютого 2022 року розпочався відкритий воєнний напад Російської Федерації на Україну. Ризик виникнення аварій з викидом широко застосовуваної небезпечної хімічної речовини хлор суттєво збільшився. Є

загроза як випадкового, так і навмисного руйнування ворогом промислових резервуарів з хлором.

З воєнної точки зору хлор є бойовою отрутною речовиною, а також використовується при виробництві бойових отрутних речовин, зокрема, іприту та фосгену.

Під час першої світової війни 22 квітня 1915 року біля міста Іпр (Бельгія) хлор вперше був застосований як бойова отрутна речовина [73]. Германські хімічні війська випустили біля 180 т хлору на позиції англійських та французьких військ. Постраждало біля 15000 людей, з яких біля 5000 померли.

13 липня 1917 року також біля міста Іпр було застосовано іприт як хімічну зброю.

1.3.2. Організація ліквідації надзвичайних ситуацій техногенного характеру з викидом важких небезпечних газів

У системі організації ліквідації НС техногенного характеру з викидом НХР підрозділами ОРС ЦЗ можна виділити наступні складові [37]:

1. Планування необхідних дій щодо гасіння пожеж і ліквідації наслідків аварій за наявності НХР.
2. Підготовка особового складу підрозділів ОРС ЦЗ до роботи під час гасіння пожеж і ліквідації наслідків аварій за наявності НХР у системі службової підготовки.
3. Організація робіт з локалізації зони та ліквідації джерела хімічного забруднення.
4. Організація робіт щодо гасіння пожеж та ліквідації наслідків аварій за наявності НХР.
5. Організація медичного забезпечення та охорони здоров'я особового складу підрозділів ОРС ЦЗ під час гасіння пожеж і ліквідації наслідків аварій за наявності НХР.

Особливості дій підрозділів ОРС ЦЗ під час ліквідації наслідків аварій на ХНО наведено в [41].

Під час виникнення аварій на ХНО можливі:

- викиди НХР у довкілля;
- пожежі з виділенням токсичних речовин;
- забруднення об'єктів і місцевості в осередках аварії та на шляху розповсюдження хмари;
- зони задимлення у поєднанні з токсичними продуктами.

Під час аварії діють декілька факторів ураження: пожежі, вибухи, хімічне забруднення повітря і місцевості, а за межами об'єкта – забруднення довкілля. Аварії на ХНО характеризуються високою швидкістю формування і дією небезпечних факторів. Заходи щодо захисту особового складу та населення, локалізації та ліквідації наслідків аварії проводяться в мінімальні строки.

2. Під час прямування до місця проведення аварійно-рятувальних робіт (АРР) керівник підрозділу через оперативно-диспетчерську службу встановлює прогнозовані межі хімічного забруднення, характеристику НХР, небезпечну зону, дає особовому складу команду до застосування ЗІЗ та використання приладів хімічної розвідки.

Особовий склад підрозділів ОРС ЦЗ допускається до проведення АРР тільки після інструктажу з питань безпеки праці, що проводять уповноважені інженерно-технічні працівники об'єкта, та надання письмового допуску із зазначенням місця проведення робіт, їх змісту та заходів безпеки.

До заходів з проведення АРР під час аварії на хімічно небезпечних об'єктах входять:

- розвідка осередку ураження з метою встановлення характеру руйнувань, типу хімічної речовини та її небезпечних концентрацій, межі зони забруднення, напрямку та швидкості розповсюдження НХР, строку дії джерела забруднення,
- своєчасне оповіщення працівників ОРС ЦЗ про виникнення загрози ураження НХР об'єктів та населених пунктів, яким загрожує небезпека,
- локалізація та ліквідація осередків ураження,

- проведення дегазації будівель та споруд, місцевості, техніки, автотранспорту, ЗІЗ, санітарної обробки особового складу та постраждалого населення,

- надання домедичної допомоги постраждалим, евакуація їх до закладів охорони здоров'я, участь в евакуації населення в безпечні райони та його розміщення.

Під час проведення рекогностування району аварії визначаються: масштаб аварії і загальний порядок її ліквідації, можливі зони забруднення НХР відповідно до метеорологічних умов, необхідна кількість сил і засобів для проведення хімічної розвідки та ліквідації наслідків НС.

Під час проведення АРР на ХНО визначаються:

- особливості об'єкта,
- характер і масштаб аварії,
- завдання підрозділам ОРС ЦЗ, обсяги робіт, способи їх проведення, час початку та завершення робіт,
- заходи безпеки під час проведення АРР та механізм застосування засобів індивідуального захисту,
- маршрути виходу із зони хімічного забруднення,
- алгоритм евакуації постраждалих,
- місця розташування медичних підрозділів,
- район збору після виконання завдань.

Хімічна розвідка організовується перед введенням основних сил, залучених до проведення АРР.

Розвідка осередку аварії проводиться тільки з використанням ізолювальних засобів індивідуального захисту органів дихання та шкіри.

Під'їзд до місця аварії здійснюється з підвітряної сторони, сили та засоби розташовуються на безпечних відстанях від зони аварії з можливістю швидкої передислокації в безпечні райони.

Підрозділи РХБЗ:

- визначають тип небезпечної хімічної речовини та її концентрацію,

- встановлюють і позначають межі зон (ділянок) забруднення, шляхи обходу зон хімічного забруднення, напрямок поширення забруднення повітря, місця можливого перекриття трубопроводів, шляхи введення сил на ділянки, об'єкти робіт, місцезнаходження постраждалих,

- визначають місця і характер пошкодження комунальних і енергетичних мереж,

- здійснюють відбір проб, надають їх до стаціонарних хімічних лабораторій для проведення аналізу.

Основними завданнями поста хімічного спостереження є спостереження за метеорологічною обстановкою і своєчасне виявлення хімічного забруднення території в межах зони відповідальності.

Під час пошуку постраждалих пости хімічного спостереження здійснюють періодичне або постійне хімічне спостереження поблизу району виникнення НС.

Пошук постраждалих проводиться насамперед на робочих місцях, шляхах евакуації, на території, починаючи з місць, розташованих поблизу джерела аварії.

Якщо НХР важча за повітря, пошук постраждалих першочергово проводиться на нижче розташованих поверхах будівель та у підвалах, а також на занижених ділянках території.

Якщо небезпечна хімічна речовина легша за повітря, то пошук постраждалих першочергово проводиться на верхніх поверхах.

Евакуація постраждалих з небезпечної зони проводиться найкоротшим шляхом до пункту прийому постраждалих.

Підрозділи РХБЗ разом з пожежно-рятувальними та інженерно-технічними підрозділами проводять дегазацію місцевості, виробничих територій, споруд і обладнання, забруднених НХР.

Насамперед дегазуються під'їзні та внутрішні об'єктові дороги, шляхи евакуації постраждалих, майданчики посадки їх у транспорт, місця розливу НХР.

За потреби місця розливу НХР обваловують, речовини з пошкоджених ємностей перекачують у непошкоджені з подальшою дегазацією пошкоджених, ставлять водяні завіси, проводять дегазацію НХР.

Після проведення АРР в осередку хімічного забруднення підрозділи ОРС ЦЗ здійснюють повну спеціальну обробку техніки та особового складу. Пункт спеціальної обробки розгортається на незабрудненій місцевості на межі маршрутів виходу із зони хімічного забруднення. Після проведення спеціальної обробки підрозділи виводяться у вихідні райони (райони зосередження) для підготовки їх до подальших дій.

Гасити пожежу за наявності хлору необхідно водою з максимально можливою відстані [37]. Слід охолоджувати ємності водою. Для розсіювання (осадження, ізоляції) парів треба використовувати розпилену воду.

Під час інтенсивного витікання для осадження хлору використовувати розпилену воду. Для нейтралізації використовувати вапняне молочко, розчини соди або каустику (60 – 80% та більше). Для нейтралізації 1 т хлору необхідно 1,5 т кальцинованої соди.

Небезпечна зона має місце в радіусі не менше 200 м від осередку витоку. Розміри зони хімічного забруднення уточнюються за результатами хімічної розвідки. У небезпечну зону дозволяється входити лише в засобах індивідуального захисту. Триматися слід з навітряного боку, уникати низьких місць. Не торкатися пролітої речовини. Потерпілим надати першу допомогу. Задіяти служби відповідно до плану локалізації та ліквідації аварії для усунення витікання, перекачувати у справну ємність, огородити місця розливів ґрунтовими валами, нейтралізувати розливи. Прибрати із зони аварії горючі матеріали. Не допускати потрапляння у водоймища, підвали, каналізацію.

В якості засобів індивідуального захисту слід використовувати ізолювальний термогазозахисний костюм ІК-ТГЗ, ізолювальні газохімізахисні костюми КІ-АР “Іній”, “Рятувальник ЗУ”, КІ-К-М “Юпітер - М”, “Рятувальник 2МУ” та аналогічні. ЗІЗ органів дихання - ізолювальні захисні дихальні апарати типу АСВ, АІР, АВХ [74, 75].

Для захисту тіла людини можливе використання не тільки спеціалізованих ЗІЗ, але й звичайних, прийнятих на озброєння у Збройних Силах України. Для захисту тіла людини можливе використання загальновійськового захисного комплексу ЗЗК. Для захисту органів дихання можливе використання військових протигазів зі спеціальними фільтрами (наприклад ВІРІД хлор, час захисної дії не перевищує 20 хвилин).

В умовах ведення бойових дій ліквідація наслідків аварії з викидом хлору ускладнюється можливістю додаткового бойового ураження особового складу ОРС ЦЗ, військових та мирного населення.

Таким чином, проаналізовано відомі НС техногенного характеру з викидом важких небезпечних газів, що трапилися у світі. Встановлено, що у зв'язку з відкритим воєнним нападом російської федерації на Україну, що розпочався 24 лютого 2022 року та триває до сьогодні, ризик виникнення аварій з викидом важких небезпечних газів, зокрема, хлору, суттєво збільшився. Є загроза як випадкового, так і навмисного руйнування ворогом промислових резервуарів з хлором. Також є небезпека застосування важких небезпечних газів (хлор, іприт, фосген тощо) як бойових отруйних речовин.

1.4. Відомі підходи до прогнозування зони хімічного забруднення при викиді важких небезпечних газів

В Україні діючим (офіційно затвердженим) алгоритмом прогнозування зони хімічного забруднення при викиді, зокрема, важких небезпечних газів є методика [42]. Тому доцільно проаналізувати її докладно.

Основними показниками, що визначають масштаб хімічного забруднення, є:

- радіус R_A (км) та площа S_A (км²) району аварії;
- глибина Γ_1 , (км) та площа S_1 (км²) поширення первинної хмари НХР;
- глибина Γ_2 (км) та площа S_2 (км²) поширення вторинної хмари НХР;
- площа $S_{ПЗХЗ}$ (км²) прогнозованої зони хімічного забруднення;

- прогнозована кількість V уражених осіб серед виробничого персоналу об'єкта, де сталася аварія, та населення, яке мешкає поблизу цього об'єкта;
- тривалість $\tau_{\text{вип}}$ хімічного забруднення;
- час $t_{1(2)}$ (год) підходу хмари НХР до об'єкта, що знаходиться в межах зон розповсюдження первинної та/або вторинної хмар НХР.

Радіус району аварії R_A (радіус кола, що визначає зовнішні кордони району аварії) залежить від виду НХР й умов її зберігання (використання). Під час проведення розрахунків значення R_A приймається для рідких НХР з низькою температурою кипіння (температура кипіння хлору Cl_2 дорівнює $(-34)^\circ\text{C}$, діоксиду сірки SO_2 – $(-10)^\circ\text{C}$, дихлорангідриду вугільної кислоти (фосгену) COCl_2 – $(+7,6)^\circ\text{C}$), що зберігаються в технологічних ємностях об'ємом до 100 т, – 0,5 км, в інших випадках – 1 км.

Радіус району аварії R_A для рідких НХР з високою температурою кипіння (температура кипіння водного розчину соляної кислоти залежить від концентрації. При кипінні 36% розчину спочатку виділяється газ HCl , а потім утворюється суміш, яка кипить з постійною температурою близько $(+110)^\circ\text{C}$ та концентрацією біля 20 % HCl) в разі руйнування технологічних ємностей об'ємом до 100 т – 0,2-0,3 км, в інших випадках – 0,5 км.

Площа $S_{\text{ПЗХЗ}}$ прогнозованої зони хімічного забруднення визначається залежно від значень радіусу аварії R_A , глибин поширення Γ_1 та Γ_2 первинної та вторинної хмар та відповідних кутів сектору поширення цих хмар φ_1 та φ_2 .

З наведеного вище можна зробити висновок, що національна методика [42] прогнозування розвитку НС з викидом, зокрема, важких небезпечних газів, є достатньо формалізованою. До недоліку також слід віднести те, що методика не враховує можливість примусового осадження НХР різними способами. Також недоліком є відсутність її програмної реалізації.

Моделі США. В США за охорону здоров'я людини та навколишнього середовища відповідає Федеральне агентство захисту навколишнього середовища (Environmental Protection Agency (US EPA)). Агентство було

засноване 2 грудня 1970 року й очолюється Адміністратором, щозначається президентом США. Його діяльність включає екологічну оцінку, дослідження, освіту та забезпечення дотримання національних стандартів, а також співпрацю з промисловістю щодо запобігання забрудненню та збереження енергії [76].

Багато моделей розсіювання, розроблених або прийнятих до використання US EPA, прийняті до використання й в інших країнах. Усі моделі US EPA умовно згруповані в чотири категорії [77]: рекомендовані, альтернативні, скринингові та фотохімічні.

Рекомендовані моделі:

AERMOD (atmospheric dispersion modeling) [78] – модель атмосферної дисперсії, заснована на структурі турбулентності пограничного шару атмосфери та концепціях масштабування, що включає обробку множинних точкових, площинних та об'ємних джерел на рівні землі та висоті. Модель враховує рівні та складні рельєфи, сільську або міську місцевість і включає алгоритми для врахування впливу будівель та проникнення струменя через інверсії на висоті. Модель використовує гаусову дисперсію для стабільних атмосферних умов (тобто низької турбулентності) та негаусову дисперсію для нестабільних умов (високої турбулентності). У модель також включені алгоритми для розрахунку виснаження струменя вологими і сухими опадами. Ця модель розроблялася близько 14 років, перш ніж була офіційно прийнята Агентством з охорони навколишнього середовища США.

AERMOD складається з трьох програмних модулів:

1. Програма моделювання стаціонарного розповсюдження, призначена для короткострокового (до 50 кілометрів) розповсюдження прямих викидів забруднюючих речовин в атмосферу, переважно від стаціонарних промислових джерел.

2. Програма обробки метеорологічних даних (meteorological data preprocessor AERMET), яка приймає метеорологічні дані про поверхню, дані зондування верхніх шарів атмосфери та дані з вимірювальних веж на місці. Потім програма обчислює атмосферні параметри, необхідні для моделі

розсіювання, такі як характеристики атмосферної турбулентності, висота змішування, швидкість тертя, довжина Моніна-Обухова та поверхневий тепловий потік.

3. Програма обробки інформації про рельєф місцевості (AERMAP), основною метою якої є забезпечення фізичного зв'язку між особливостями рельєфу та поведінкою шлейфів забруднення повітря. Вона генерує дані про місце знаходження та висоту для кожного джерела. Вона також надає інформацію, яка дозволяє моделі розповсюдження моделювати ефекти повітряного потоку над пагорбами або їх розщеплення для обтікання пагорбів.

На рис. 1.1. наведений приклад прогнозування хімічної обстановки за допомогою програми AERMOD.

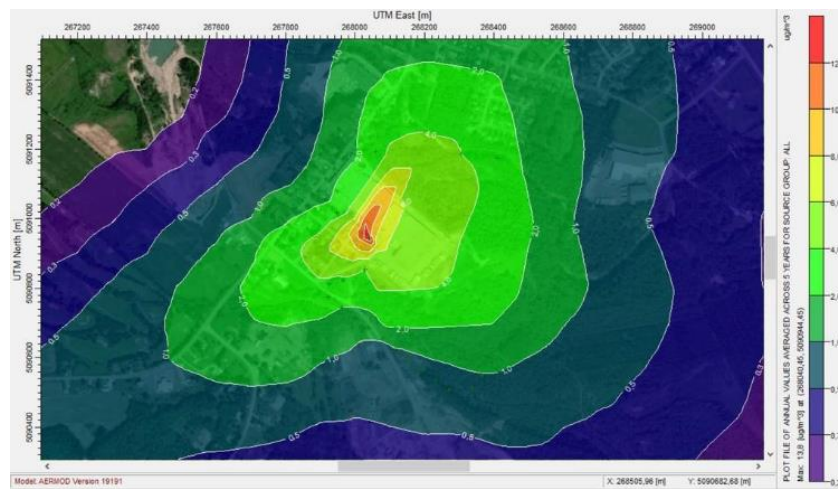


Рис. 1.1. Результати прогнозування за допомогою програми AERMOD

CALPUFF [79] – нестационарна модель розсіювання хмар пилу, що імітує вплив мінливих у часі та просторі метеорологічних умов на перенесення, трансформацію та видалення забруднюючих речовин. Модель CALPUFF може застосовуватися для перенесення забруднюючих речовин на великі відстані та в умовах складного рельєфу. Модель розроблена Групою Атмосферних Досліджень (Atmospheric Studies Group) компанії TRC Solutions. Модель CALPUFF була спочатку розроблена компанією Sigma Research Corporation (SRC) наприкінці 1980-х років за контрактом з Каліфорнійською радою з

питань повітряних ресурсів (CARB) і вперше була випущена приблизно в 1990 році. Пізніше Sigma Research Corporation увійшла до складу Earth Tech, Inc. Після того, як Агентство з охорони навколишнього середовища США (EPA) визнало CALPUFF кращою моделлю у своїх Рекомендаціях щодо моделей якості повітря, Earth Tech стала офіційним дистриб'ютором цієї моделі. CALPUFF застосовується для оцінювання перенесення забруднюючих речовин на великі відстані та їх впливу на федеральні території, а також для окремих випадків застосування в безпосередній близькості від джерел забруднення за складних метеорологічних умов.

Інтегрована система моделювання CALPUFF складається з трьох основних компонентів та набору програм попередньої та подальшої обробки даних. Основними компонентами системи моделювання є CALMET (діагностична тривимірна метеорологічна модель), CALPUFF (модель розповсюдження забруднення повітря) та CALPOST (пакет програм для подальшої обробки даних). Кожна з цих програм має графічний інтерфейс користувача (GUI). Крім цих компонентів, існує багато процесорів, які можуть використовуватися для підготовки геофізичних даних (використання землі та рельєфу) у багатьох стандартних форматах, метеорологічних даних (дані про поверхню, верхні шари атмосфери, опади та буї) та інтерфейсів до інших моделей, таких як масштабна модель Penn State/NCAR (MM5), модель Eta Національного центру екологічних прогнозів (NCEP) та метеорологічна модель RAMS.

Модель CALPUFF призначена для моделювання розсіювання плавучих, точкових та площинних джерел забруднення, а також розсіювання плавучих лінійних джерел. Модель також включає алгоритми для обробки ефекту низхідного потоку повітря від сусідніх будівель на шляху руху шлейфу забруднення.

BLP – модель розсіювання гаусового шлейфу, розроблена для розв'язання унікальних завдань моделювання, пов'язаних з промисловими

джерелами викиду, де важливі ефекти підйому шлейфу і змиву від стаціонарних лінійних джерел.

CALINE3 – модель гаусової дисперсії в стаціонарному стані, призначена для визначення концентрацій забруднень у місцях розташування чутливих датчиків з підвітряного боку автомагістралей, розташованих на відносно нескладній місцевості.

CAL3QHC та CAL3QHCR – CAL3QHC – модель на основі CALINE3 з розрахунком черг і моделлю дорожнього руху для розрахунку затримок і черг на регульованих перехрестях. CAL3QHCR – це більш досконала версія на основі CAL3QHC, що вимагає наявності локальних метеорологічних даних.

CTDMPLUS – складна модель дисперсії рельєфу місцевості (CTDM) з алгоритмами для нестабільних ситуацій (наприклад, в умовах високої турбулентності атмосфери). Це уточнена гаусова модель якості повітря з точковим джерелом забруднення, призначена для використання в будь-яких умовах стабільності (наприклад, при будь-якому ступені атмосферної турбулентності) на складних рельєфах.

OCD (Offshore and coastal diffusion model) – гаусова модель, розроблена для визначення впливу викидів забруднюючих речовин з точкових, площинних або лінійних джерел на якість повітря в прибережних районах. Вона враховує перенесення і розсіювання забруднюючих речовин надводним шлейфом, а також зміни, що відбуваються при перетині шлейфом берегової лінії.

Альтернативні моделі:

ADAM (Air force dispersion assessment model) – модель оцінки розсіювання у військово-повітряних силах – це модифікована гаусова модель розсіювання, яка включає в себе термодинаміку, хімію, теплопередачу, аерозольне навантаження та ефекти щільного газу

ADMS-5 (Atmospheric Dispersion Modelling System) – система моделювання розсіювання забруднюючих речовин в атмосфері – вдосконалена модель розсіювання, розроблена у Сполученому Королівстві для розрахунку концентрацій забруднюючих речовин, що викидаються як безперервно з

точкових, лінійних, об'ємних і площинних джерел, так і дискретно з точкових джерел.

AFTOX – модель гаусового розсіювання, яка обробляє безперервні або хмароподібні, рідкі або газові, надземні або поверхневі викиди з точкових або площинних джерел.

DEGADIS (Dense gas dispersion) – Модель розсіювання щільних газів - модель, що імітує розсіювання на рівні землі площинних хмароподібних джерел газів або аерозолів, більш щільних, ніж повітря, що викидаються з нульовим імпульсом в атмосферу над пласкою, рівною місцевістю.

HGSYSTEM – набір комп'ютерних програм, розроблених компанією Shell Research Ltd. і призначених для прогнозування джерела та подальшого розсіювання випадкових викидів хімічних речовин з акцентом на поведінку щільного газу.

HOTMAC і RAPTAD – HOTMAC – це модель прогнозування погоди, яка використовується спільно з RAPTAD, моделлю перенесення і розсіювання забруднюючих речовин. Ці моделі застосовуються для складних рельєфів, прибережних районів, міських територій і територій навколо будівель, де інші моделі неефективні.

HYROAD – гібридна модель дорожньої мережі; об'єднує три окремі модулі, що моделюють викиди забруднюючих речовин від транспортних засобів та їх розсіювання. Модуль розсіювання являє собою модель, що визначає концентрацію оксиду вуглецю (CO) або інших газоподібних забруднюючих речовин, а також твердих частинок (PM) з викидів транспортних засобів в межах 500 метрів від перехресть доріг.

ISC3 – гаусова модель, що використовується для оцінки концентрацій забруднюючих речовин з широкого спектру джерел, пов'язаних з промисловим комплексом. Ця модель враховує: осадження і сухе випадання частинок; низхідний потік; точкові, площинні, лінійні та об'ємні джерела; підйом шлейфу залежно від відстані у напрямку вітру; поділ точкових джерел; та обмежене коригування рельєфу. ISC3 працює як у довгостроковому, так і в

короткостроковому режимі.

OBODM (open burning and open detonation model) – модель для оцінки впливу відкритого спалювання та детонації (OB/OD) застарілих боєприпасів і твердих палив на якість повітря. Вона використовує алгоритми розсіювання та осадження, запозичені з існуючих моделей для миттєвих і квазі-безперервних джерел, для прогнозування перенесення та розсіювання забруднюючих речовин, що викидаються в результаті відкритого спалювання та детонації.

PANACHE (Fluidyn-PANACHE) – ейлерова (і лагранжева для твердих частинок) тривимірна модель механіки рідини з кінцевим об'ємом, призначена для моделювання безперервного і короткочасного розсіювання забруднюючих речовин в атмосфері на простих або складних рельєфах.

PLUVUEП – модель, що оцінює погіршення видимості та зміну кольору атмосфери, спричинені шлейфами, які утворюються в результаті викидів частинок, оксидів азоту та оксидів сірки. Модель прогнозує перенесення, розсіювання, хімічні реакції, оптичні ефекти та поверхневе осадження таких викидів з одного точкового або локального джерела.

SCIPUFF – модель розсіювання хмари, що використовує набір гаусових хмар для прогнозування тривимірних, залежних від часу концентрацій забруднюючих речовин. Крім середнього значення концентрації, модель прогнозує статистичну дисперсію концентрацій, обумовлену випадковими коливаннями вітру.

SDM (Shoreline dispersion model) – модель розсіювання на береговій лінії – гаусівська модель розсіювання, яка використовується для визначення концентрацій на рівні землі від викидів високих стаціонарних точкових джерел поблизу берегової лінії.

SLAB – модель викидів газових шлейфів, густина яких перевищує густину повітря, що використовує одновимірні рівняння кількості руху, закони збереження маси та енергії, а також рівняння стану. Модель враховує викиди з точкових джерел на рівні землі, викиди з піднесених струменів, викиди з об'ємних джерел і викиди, що виникають при випаровуванні розлитих летких

рідин.

Скринінгові моделі (моделі, що використовуються перед застосуванням уточненої моделі якості повітря, щоб визначити, чи потрібне уточнене моделювання):

AERSCREEN – версія AERMOD для скринінгу, що є рекомендованою US EPA. Вона дозволяє отримувати оцінки концентрацій без необхідності використання метеорологічних даних, які дорівнюють або перевищують оцінки, отримані AERMOD з використанням повного набору метеорологічних даних.

CTSCREEN – скринінгова версія CTDMPLUS.

SCREEN3 – скринінгова версія ISC3.

TSCREEN (Toxics screening model) – модель скринінгу токсичних речовин, яка є гаусовою моделлю для скринінгу викидів токсичних забруднюючих речовин в повітря та їх подальшого розсіювання з можливих джерел на об'єктах суперфонду (федеральна програма США з відновлення навколишнього середовища, створено відповідно до Закону про комплексні заходи з реагування на екологічні НС, компенсації та відповідальність 1980 року (CERCLA)). Модель містить 3 модулі: SCREEN3, PUFF і RVD (Relief Valve Discharge).

VALLEY – Універсальна гаусова модель розсіювання для оцінки 24-годинних або річних концентрацій, що утворюються з 50 точкових і площинних джерел викиду.

COMPLEX1 – модель скринінгу множинних точкових джерел з коригуванням рельєфу місцевості, що використовує алгоритм впливу шлейфу моделі VALLEY.

Фотохімічні моделі (моделі являють собою великомасштабні моделі якості повітря, які імітують зміни концентрації забруднюючих речовин в атмосфері, описуючи хімічні та фізичні процеси в атмосфері):

CMAQ (community multi-scale air quality) – модель багатомасштабної якості повітря в громаді, що має сучасні наукові можливості для проведення

моделювання в масштабах міста та регіону різних проблем якості повітря, включаючи тропосферний озон, дрібні частинки, токсичні речовини, кислотні відкладення та погіршення видимості.

CAMx (The comprehensive air quality model with extensions) – комплексна модель якості повітря з розширеннями моделює якість повітря в різних географічних масштабах. Вона враховує різні інертні та хімічно активні забруднювачі, включаючи озон, тверді частинки, неорганічні та органічні частинки PM_{2.5}/PM₁₀, а також ртуть та інші токсичні речовини.

REMSAD (The regional modeling system for aerosols and deposition) – регіональна система моделювання аерозолів та опадів розраховує концентрації як інертних, так і хімічно активних забруднюючих речовин, моделюючи атмосферні процеси, що впливають на концентрацію забруднюючих речовин у регіональному масштабі. Система включає процеси, пов'язані з регіональним димом, твердими частинками та іншими забруднюючими речовинами в повітрі, включаючи розчинні кислотні компоненти та ртуть.

Моделі ЄС. В Європейському Союзі (ЄС) створено Європейське агентство з охорони навколишнього середовища (European Environment Agency (EEA)), яке надає незалежну інформацію про навколишнє середовище в галузі кліматичної політики, збереження біорізноманіття та інших екологічних цілей, встановлених країною. В EEA входить Європейський тематичний центр по повітрю та зміні клімату (The European Topic Centre on Air and Climate Change), який підтримує он-лайн систему документації моделей (Model Documentation System – MDS), яка включає описи та іншу інформацію практично з усіх моделей розсіювання, розроблених країнами Європи (біля 200 моделей). Деякі з європейських моделей, представлених в MDS, знаходяться у відкритому доступі, а деякі – ні. Приведемо скорочене описання деяких моделей.

AEROPOL (Естонія) – Модель розроблена в Тартуській обсерваторії, являє собою гаусову модель струменя, призначену для моделювання поширення безперервних струменів від стаціонарних точкових, лінійних і площинних джерел над плоскою місцевістю в локальному і регіональному

масштабі. Вона враховує виснаження струменя за рахунок вологих і/або сухих опадів, а також вплив будівель на шляху струменя.

AIRVIRO GAUSS (Швеція) – гаусова модель розсіювання, що враховує точкові, дорожні, площинні та сіткові джерела, розроблена в Шведському метеорологічному та гідрологічному інституті (Swedish Meteorological and Hydrological Institute). Шлейфи слідуєть траєкторіям, заданим вітровою моделлю, і кожен шлейф має граничне значення, що залежить від швидкості вітру. Модель також підтримує нерегулярні розрахункові сітки.

AUSTAL2000 (Німеччина) – офіційна модель розсіювання в атмосфері, яка використовується Федеральним агентством з охорони навколишнього середовища Німеччини (German Federal Environmental Agency) при видачі дозволів на промислові джерела викиду. Модель враховує точкові, лінійні, площинні та об'ємні джерела плавучих шлейфів. Вона враховує вплив будівель, складний рельєф, виснаження шлейфу вологими або сухими відкладеннями, а також хімічні реакції першого порядку.

BUO-FMI (Фінляндія) – модель була розроблена Фінським метеорологічним інститутом (Finnish Meteorological Institute) спеціально для оцінки атмосферної дисперсії нейтральних або плавучих газів і частинок, що викидаються в шлейф, який утворюється під час пожеж на складах і хімічних складах. Вона являє собою гібрид локальної гаусової моделі шлейфу та моделі іншого типу. У ній враховується виснаження шлейфу за рахунок сухого осадження, але не вологого.

DIPCOT (Dispersion over complex terrain, Греція) – модель розсіювання на складному рельєфі – модель, розроблена в Національному центрі наукових досліджень «ДЕМОКРИТОС» (National Centre of Scientific Research "Demokritos"), яка моделює розсіювання плавучих струменів з декількох точкових джерел на складному рельєфі в локальному та регіональному масштабі. Вона не враховує вологі відкладення та хімічні реакції.

EK100W (Польща) – модель гаусового шлейфу, що використовується для оцінки впливу забруднюючих речовин з промислових точкових джерел на

якість повітря, а також для досліджень якості міського повітря в локальному масштабі. Вона враховує вологі та сухі опади. Вплив складного рельєфу не враховується.

FARM (The Flexible Air quality Regional Model, Італія) – гнучка регіональна модель якості повітря – багатомережева ейлерова модель розсіювання, трансформації та осадження забруднюючих речовин у повітрі в газовій та аерозольній фазах, включаючи фотоокислювачі, аерозолі, важкі метали та інші токсичні речовини. Вона підходить для проведення тематичних досліджень, оцінки якості повітря, аналізу сценаріїв та прогнозування викидів забруднюючих речовин.

LAPMOD (LAgrangian Particle MODel, Італія) – розроблена компанією Enviroware і доступна безкоштовно. LAPMOD – це модель лагранжевих частинок, повністю пов'язана з діагностичною метеорологічною моделлю CALMET, і може використовуватися для моделювання розсіювання інертних забруднюючих речовин, а також запахів і радіоактивних речовин. Вона включає в себе алгоритми сухого і вологого осадження і вдосконалені чисельні схеми для підйому шлейфу. Вона може моделювати інертні забруднюючі речовини, запахи та радіоактивні речовини і є частиною ARIES, офіційної італійської системи моделювання ядерних аварійних ситуацій, якою керують ISPRA та регіональне агентство з охорони навколишнього середовища Емілії-Романї, Італія.

PANACHE (Франція) – автономний програмний пакет для повністю тривимірної гідродинаміки, призначений для моделювання випадкового або безперервного поширення промислових і міських забруднюючих речовин в атмосфері. Він моделює викиди і поширення токсичних/горючих речовин в різних погодних умовах в тривимірних складних полях вітру і турбулентності. Потік, перенесення/дифузія, викликані газом, частинками і краплями, моделюються за допомогою рівнянь Нав'є-Стокса для струменевих, щільних, холодних, криогенних або гарячих, плавучих викидів. Додаток охоплює як дуже короткі (десятки метрів), так і локальні (десятки кілометрів) масштаби, де

складна структура потоку розраховується в явному вигляді, враховуючи перешкоди, різні типи землекористування та рельєф місцевості.

SEVEX (Бельгія) – Експертна модель Севезо, імітує аварійний викид токсичних і/або легкозаймистих матеріалів на рівній або складній місцевості з декількох трубопроводів і резервуарів, а також при випаровуванні розлитих летких рідин. Аварійні викиди можуть бути безперервними, короточасними або катастрофічними. Інтегрована модель може працювати як з газами, щільнішими за повітря, так і з нейтральними газами (тобто не щільнішими і не легшими за повітря). Вона не враховує роботу з багатокомпонентними матеріалами і не передбачає хімічну трансформацію викидів. Назва моделі пов'язана з великою катастрофою, спричиненою аварійним викидом високотоксичних газів, що сталася в Севезо (Італія) в 1976 році.

Моделі Сполученого Королівства.

ADMS-5 - модель описана раніше в розділі альтернативних моделей US EPA.

GASTAR – модель для моделювання аварійних викидів горючих і токсичних газів, густини яких перевищує густину повітря. Вона враховує миттєві та безперервні викиди, викиди з струменевих джерел, викиди при випаровуванні калюж летких рідин, різні ухили та нерівності рельєфу, перешкоди, такі як паркани та будівлі, а також викиди, що змінюються в часі.

Модель Канади.

MLDPn (*Modèle Lagrangien dedispersion de particules d'ordre n*) – лагранжева модель дисперсії частинок (LPDM), розроблена Канадським метеорологічним центром (СМС) Міністерства навколишнього середовища Канади. Ця модель атмосферного і водного перенесення та розсіювання призначена для оцінки концентрації забруднюючих речовин у повітрі та воді, а також їх осадження на ґрунті при розв'язанні різних завдань реагування на НС в різних масштабах (від локального до глобального). Вона використовується для прогнозування та відстеження вулканічного попелу, радіоактивних матеріалів, диму від лісових пожеж, НХР, а також нафтових плям.

До окремого сімейства необхідно віднести моделі, безпосередньо призначені для використання рятувальниками. Уваги заслуговує національна розробка «ДСНС ГІС» та американська ALOHA.

«ДСНС ГІС» (Геоінформаційна система (ГІС) ДСНС) – система, яка використовує географічні карти та пов'язані з ними дані для управління діяльністю ДСНС, наприклад, для аналізу зон НС, планування реагування та моніторингу безпеки територій [80]. «ДСНС ГІС» – це спеціалізований картографо-аналітичний ресурс, призначений для збору, збереження, накопичення, аналізу та відображення інформації у сфері пожежної та техногенної безпеки, цивільного захисту, для моніторингу за станом готовності відповідної інфраструктури до подолання потенційних наслідків НС. Продукт призначений до впровадження в структурних підрозділах ДСНС для оперативного реагування на НС, чіткого розподілу ресурсів підпорядкованих підрозділів, моніторингу та контролю за станом боєздатності пожежної, спеціальної та іншої техніки, пожежно-технічного озброєння та аварійно-рятувального обладнання. На рис. 1.2 наведено результати прогнозування за допомогою програми «ДСНС ГІС»

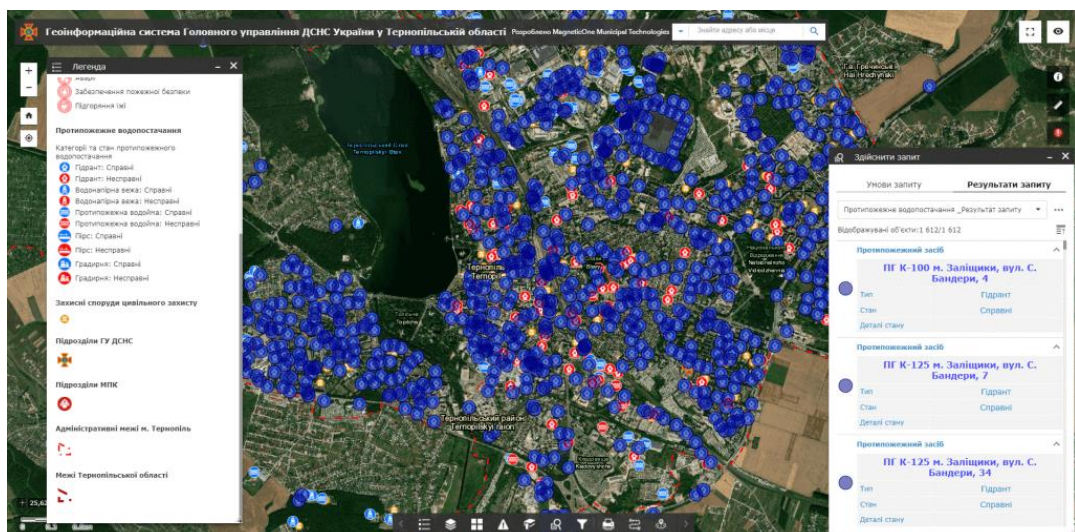


Рис. 1.2. Результати прогнозування за допомогою програми «ДСНС ГІС»

В США для аналогічних цілей використовується програма ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres – площі розташування небезпечних

атмосфер) [81]. Програма моделювання небезпек ALOHA входить до складу програмного пакету CAMEO, який використовується для планування та реагування на НС, пов'язані з небезпечними хімічними речовинами.

Інформація про реальний або можливий викид НХР може бути введена в ALOHA, й програма згенерує оцінку зони загрози. ALOHA може моделювати хмари токсичних газів, хмари легкозаймистих газів, вибухи, струменеві пожежі, пожежі басейнів та вибухи хмар пари. Оцінки зони загрози відображаються на сітці в ALOHA, а також можуть бути нанесені на карти в MARPLOT, Esri's ArcMap, Google Earth та Google Maps. Червона зона загрози відповідає найгіршому рівню небезпеки; помаранчева та жовта зони загрози відповідають областям зі зменшенням небезпеки (рис. 1.3).

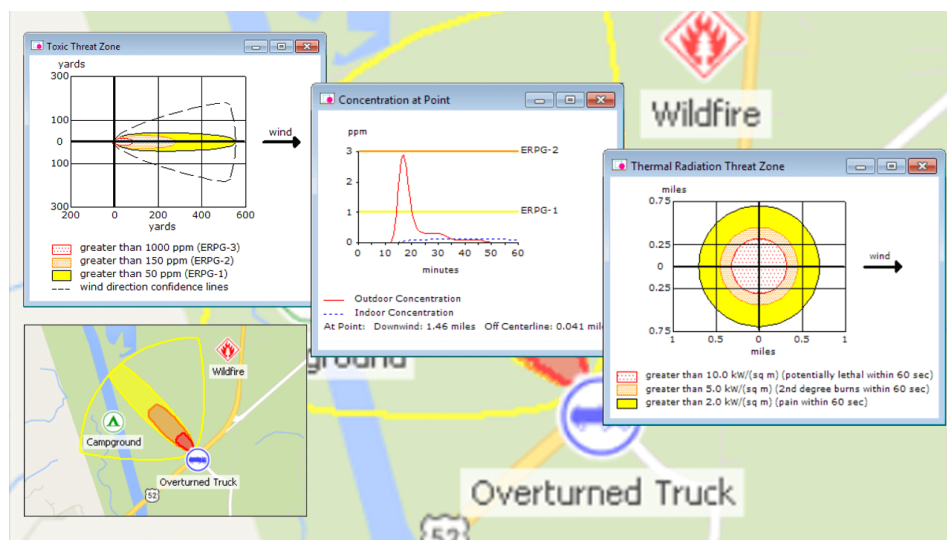


Рис. 1.3. Результати прогнозування за допомогою програми ALOHA

Особливостями розглянутих вище практично усіх моделей є необхідність наявності високоякісного комп'ютерного забезпечення, що може ускладнити процес прогнозування, особливо в умовах обмеженого часу на ліквідацію НС.

Таким чином, проаналізовано національні та закордонні алгоритми прогнозування розвитку НС з викидом важких небезпечних газів. Проведений аналіз національних та світових підходів до прогнозування зон хімічного забруднення важкими небезпечними газами встановив, що кожен з підходів має

свої особливості. Встановлено, що на сьогодні не існує методу прогнозування наслідків аварій з викидом важких небезпечних газів, який враховує можливість осадження важких небезпечних газів з атмосфери дисперсними потоками води або води з хімічними нейтралізаторами.

Висновки до розділу 1

1. Встановлено, що нормативна база України є структурованою та достатньою для регулювання процесів запобігання, реагування та ліквідації хімічних НС, поєднуючи стратегічне управління з детальними інструкціями для практичного застосування на місцях. Аналіз нормативної бази України демонструє, що система ліквідації наслідків НС з викидом НХР має комплексний, багаторівневий та взаємопов'язаний характер.

2. Встановлено, що хімічно небезпечні гази, зокрема, важчі за повітря становлять значну небезпеку через їхнє скупчення в низинах. До них належать, зокрема, діоксид сірки, дихлорангідрид вугільної кислоти (фосген), пари соляної кислоти та хлор. Їхня висока відносна густина сприяє повільному розсіюванню та формуванню стійких осередків зараження приземного шару.

3. Проаналізовано відомі НС техногенного характеру з викидом важких небезпечних газів, що трапилися у світі. Встановлено, що у зв'язку з відкритим воєнним напад російської федерації на Україну, що розпочався 24 лютого 2022 року та триває до сьогодні, ризик виникнення аварій з викидом важких небезпечних газів, зокрема, хлору, суттєво збільшився. Є загроза як випадкового, так і навмисного руйнування ворогом промислових резервуарів з хлором. Також є небезпека застосування важких небезпечних газів (хлор, іприт, фосген тощо) як бойових отрутих речовин.

4. Проаналізовано національні та іноземні алгоритми прогнозування зони хімічного забруднення при викиді важких небезпечних газів. З проведеного аналізу національних та світових підходів до прогнозування зон хімічного забруднення важкими небезпечними газами встановлено, що кожен з підходів

має свої особливості. На сьогодні не існує методу прогнозування наслідків аварій з викидом важких небезпечних газів, який враховує можливість осадження важких небезпечних газів з атмосфери дисперсними потоками чистої води або води з хімічними нейтралізаторами.

РОЗДІЛ 2.

ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ ОСАДЖЕННЯ ВАЖКИХ НЕБЕЗПЕЧНИХ ГАЗІВ ДРІБНОДИСПЕРСНИМ РІДИННИМ ПОТОКОМ

В даному розділі розроблено математичну модель сорбції важких небезпечних газів дрібнодисперсним рідинним потоком, яка дозволяє врахувати основні параметри сорбції, параметри навколишнього середовища, параметри рідинного потоку, що подається на осадження та фізико-хімічні властивості рідини у цьому потоці. Проведено математичний опис розповсюдження важких небезпечних газів за умов їх примусового осадження та запропоновано методику чисельного їх розв'язання з використанням методу скінчених різниць. Досліджена кінетика хімічної нейтралізації дрібнодисперсним потоком води з нейтралізатором важких небезпечних газів на прикладі важкого небезпечного газу – хлору. Отримано, що активність хімічних нейтралізаторів, що можуть додаватися до дрібнодисперсного потоку води, є різною при хімічній реакції з хлором.

Основні результати розділу викладені в публікаціях [15-17, 21-31].

2.1. Модель сорбції важких небезпечних газів дрібнодисперсним потоком води

Побудуємо модель сорбції важких небезпечних газів дрібнодисперсним потоком води.

Масообмінні процеси важкого небезпечного газу на поверхні води складаються із послідовності різних етапів (рис. 2.1).

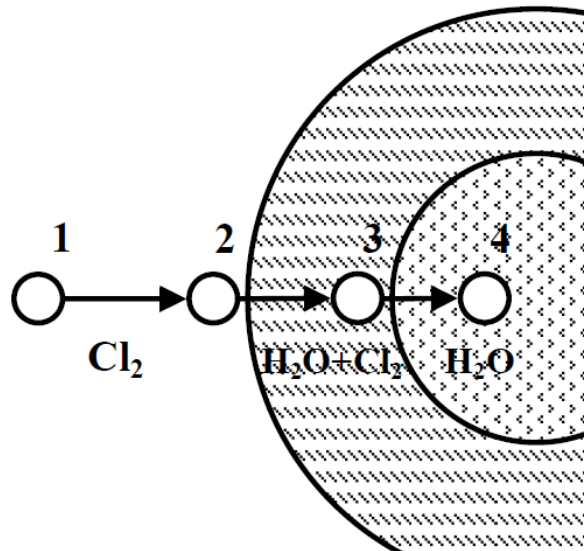


Рис. 2.1. Схема процесу абсорбції важкого небезпечного газу краплею води (на прикладі хлору)

Умовно процес сорбції важкого небезпечного газу дисперсним потоком води можна розділити на такі елементарні етапи:

Етап 1. Дифузія важкого небезпечного газу у повітрі до поверхні краплі.

Етап 2. Акомодація молекул важкого небезпечного газу на поверхні краплі.

Етап 3. Насичення поверхневого шару краплі абсорбованим важким небезпечним газом.

Етап 4. Відведення абсорбованого важкого небезпечного газу із поверхневого шару краплі у об'єм краплі внаслідок внутрішньої дифузії.

Кожен з етапів має свою фізико-хімічну кінетику та окремий комплекс визначальних факторів. Тому поєднання всіх етапів для опису загальною математичною моделлю викликає ряд складнощів, які впливають як на точність моделювання так і на здатність отриманої моделі до модернізації під певні умови. Тому пропонується розглянути саме поетапну модель сорбції важкого небезпечного газу краплею рідини. В якості рідини осадження можуть розглядатися вода та водні розчини нейтралізаторів, хімічні властивості яких будуть розглянуті далі.

Етап 1. Процес дифузії важкого небезпечного газу у повітрі до поверхні краплі.

Коефіцієнт дифузії небезпечного газу за певних умов D_g визначається із співвідношення:

$$D_g = D_0 \cdot \frac{P_0}{P} \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1,75}, \quad (2.1)$$

де D_0 – коефіцієнт дифузії важкого небезпечного газу за стандартних умов ($P_0 = 10^5$ Па; $T_0 = 273$ К);

P , T – тиск та температура реальних умов атмосфери для яких проводиться розрахунок.

Використовуючи коефіцієнт дифузії важкого небезпечного газу за формулою Смолуховського-Ейнштейна [82] можна визначити частоту зіткнень молекул важкого небезпечного газу з краплею води довільного розміру:

$$k_{\text{coll}} = 4\pi \cdot (R_g + R_{\text{drop}}) \cdot (D_g + D_{\text{drop}}), \quad (2.2)$$

де R_g , D_g – радіус молекули та коефіцієнт дифузії важкого небезпечного газу;

R_{drop} , D_{drop} – радіус та коефіцієнт дифузії краплини дрібнодисперсного потоку води.

Припустимо, що процес осадження хлору здійснюється звичайними підрозділами ОРС ЦЗ із застосуванням штатного пожежно-технічного обладнання. Існуюче на сьогодні обладнання дозволяє отримати дрібнодисперсний потік води із середнім радіусом краплі не менше $R_{\text{drop}} \approx 0,5$ мм [83]. Відповідно $R_g \ll R_{\text{drop}}$, $D_g \gg D_{\text{drop}}$, що із (2.2) дозволяє отримати

$$k_{\text{coll}} = 4\pi \cdot R_{\text{drop}} \cdot D_g \cdot \quad (2.3)$$

Приймаючи до уваги (2.1) та (2.3) та використовуючи параметри концентрації важкого небезпечного газу в атмосфері C_g та концентрації крапель, що утворюються розпилювачем при осадженні C_{drop} отримаємо рівняння частоти зіткнень молекул важкого небезпечного газу з поверхнею краплі:

$$I_{\text{coll}} = k_{\text{coll}} \cdot C_{\text{drop}} \cdot C_g \cdot \quad (2.4)$$

Звичайно в реальних умовах існують ламінарні та турбулентні потоки газу з різними концентраціями, а краплі дисперсного рідинного потоку можуть зіткнутися одна з одною та коагулювати. Однак для умов моделювання процесу НС ці параметри можна брати квазістаціонарними в межах умовного одиничного об'єму.

Етап 2. Наступним етапом сорбції є проникнення молекул важкого небезпечного газу крізь поверхневий шар молекул води у краплі. Не всім молекулам, що стикаються із поверхнею води за рівнянням (2.4) достатньо кінетичної енергії для подолання енергії відштовхування від молекул води у поверхневому шарі. В роботі [84] запропоновано енергетичну модель розрахунку коефіцієнту масової акомодатії:

$$\alpha = 1 - \int_{E_{g-d}}^{E_{d-d}} f(E_g, T_g) dE_g, \quad (2.5)$$

де E_g, T_g – енергія та температури молекул важкого небезпечного газу;

E_{d-d}, E_{g-d} – енергія міжмолекулярного зв'язку між молекулами води та води та важкого небезпечного газу відповідно.

При зіткненні із краплею молекули важкого небезпечного газу з кінетичною енергією більшою за енергію зв'язку молекул води на поверхні краплі ($E_g > E_{d-d}$), розривають зв'язок вода-вода та проникають в поверхневий шар краплі. У випадку $E_g < E_{d-d}$ поверхневий молекулярний шар не руйнується та при швидкостях зіткнення, що відповідають швидкості польоту вільної молекули газу, рідина поводить себе як нестислива та абсолютно пружна. Оскільки маса краплі набагато більша за масу молекули важкого небезпечного газу ($m_g \ll m_d$), то молекула важкого небезпечного газу після зіткнення відскакує з тією ж енергією, що й була до зіткнення. Однак при відстанях менше радіуса Дебая [85] між поверхневими молекулами краплі та молекулою важкого небезпечного газу діють сили хімічної взаємодії E_{g-d} , які притягують молекулу важкого небезпечного газу до поверхні. За умови $E_g \leq E_{g-d}$ молекула важкого небезпечного газу адсорбується на поверхні краплі. В роботах [86, 87] наведені результати розрахунків коефіцієнтів акомодатії для деяких небезпечних газів.

Етап 3. Після захоплення молекул важкого небезпечного газу поверхнею краплі за рахунок міжмолекулярної взаємодії, молекули важкого небезпечного газу проникають у приграничний поверхневий шар води. Інтенсивність насичення приграничного шару краплі молекулами абсорбованого важкого небезпечного газу можна оцінити використовуючи рівняння Генрі [88]. Звичайно окрім тиску середовища, в якому протікає процес сорбції важливим є його температура та коефіцієнт поверхневого натягу краплини води. Відповідно коефіцієнт насичення поверхневого шару води абсорбованим важким небезпечним газом можна записати у вигляді:

$$\theta_{\text{sorb}} = \frac{R_0 \cdot T}{\sigma} \cdot H \cdot P \cdot \tau, \quad (2.6)$$

де R_0 – універсальна газова стала;

σ – коефіцієнт поверхневого натягу абсорбенту;

H – константа Генрі;

τ – характерний час процесу.

Як видно з рівняння (2.6) окрім параметрів навколишнього середовища визначальним параметром є константа Генрі. В таблиці 2.1 наведено константи Генрі ($H \cdot 10^4$) та коефіцієнт дифузії ($D_g \cdot 10^4$) для деяких небезпечних газів, що впливають на процес їх абсорбції за нормальних умов ($T=273\text{K}$, $P=10^5 \text{ Па}$) [89, 90].

Табл. 2.1. Фізико-хімічні властивості небезпечних газів, що впливають на процес їх абсорбції за нормальних умов ($T=273\text{K}$, $P=10^5 \text{ Па}$)

Небезпечний газ	Константа Генрі $H \cdot 10^4$, моль \cdot м ⁻³ \cdot Па ⁻¹	Коефіцієнт дифузії $D_g \cdot 10^4$, м ² \cdot с ⁻¹	Реакція небезпечного газу з водою
Небезпечний газ, що є легким відносно повітря			
NH ₃	2700	0,198	$\text{NH}_3 + n \cdot \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{NH}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$
HCN	750	0,136	$\text{HCN} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NH}_4^+ + \text{HCOO}^-$
Небезпечний газ, що є важким відносно повітря			
HCl	1900	0,130	$\text{HCl} + n \cdot \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{HCl} \cdot n\text{H}_2\text{O}$
SO ₂	150	0,122	$\text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2\text{SO}_3$, $\text{H}_2\text{SO}_3 \rightleftharpoons \text{HSO}_3^- + \text{H}^+$
Cl ₂	9,3	0,124	$\text{Cl}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{Cl}^- + \text{HClO}$
COCl ₂	1100	0,121	$\text{COCl}_2 + n \cdot \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{COCl}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$

З таблиці 2.1 видно, що коефіцієнт дифузії $D_g \cdot 10^4$ для всіх наведених небезпечних газів суттєво не відрізняється (значення відрізняються в діапазоні 1-25%). Але константи Генрі $H \cdot 10^4$ для наведених небезпечних газів відрізняються значно. Константа Генрі у аміаку NH₃ є найбільшою, а у хлору

Cl_2 – найменшою (константа Генрі аміаку NH_3 майже у 300 разів перевищує константу Генрі хлору Cl_2). Відповідно можна припустити, що за однакових умов і інтенсивність сорбції небезпечних газів буде суттєво відрізняться.

Етап 4. Наступним етапом сорбції є дифузія поглиненого у приграничному шарі небезпечного газу у весь об'єм краплі води. Інтенсивність цього процесу визначається коефіцієнтом дифузії небезпечного газу в рідині D_{drop} . Враховуючи рівняння (2.4), (2.6) та коефіцієнт акомодатії α загальна швидкість абсорбції небезпечного газу визначається як:

$$V_{\text{sorb}} = I_{\text{coll}} \cdot \theta_{\text{sorb}} \cdot \alpha \cdot \sqrt{\frac{D_{\text{drop}}}{\pi \tau}}. \quad (2.7)$$

Результати розрахунку швидкості абсорбції небезпечних газів, наведених у таблиці 2.1, побудовано на рис. 2.2.

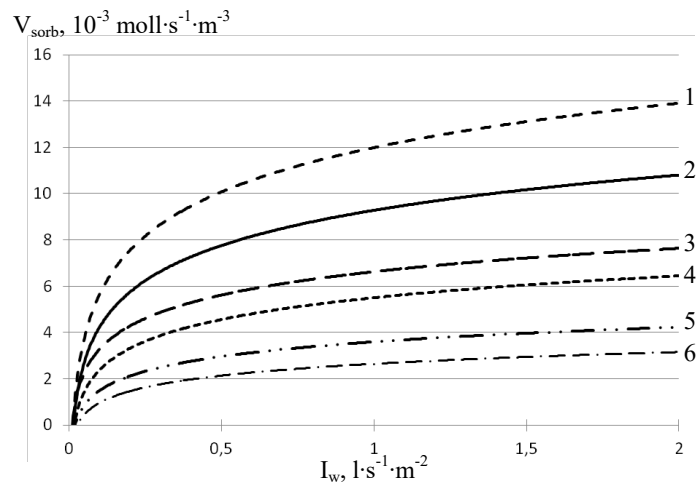


Рис. 2.2. Залежність інтенсивності V_{sorb} осадження небезпечних газів від інтенсивності I_w подачі дисперсного потоку чистої води: 1 - NH_3 ; 2 - HCl ; 3 - COCl_2 ; 4 - HCN ; 5 - SO_2 ; 6 - Cl_2

Чисельно моделювання проводилось у вигляді залежності інтенсивності абсорбції від інтенсивності подачі розпиленої води. Параметри розпилення та інтенсивності подачі брались відповідно до технічних характеристик ручних

пожежних стволів PROTEK 360/366 [91], які штатно використовуються підрозділами ОРС ЦЗ для осадження водою НХР з атмосфери при їх викиді під час НС. Дисперсність водяного потоку дорівнює 1 мкм, максимальна інтенсивність подачі $2 \text{ л}(\text{с} \cdot \text{м}^2)$.

При розробці моделі сорбції небезпечних газів (рівняння (2.4)-(2.7)) використовувались загальні уявлення про фізико-хімічні та масообмінні процеси. Це має свої переваги та недоліки. До переваг запропонованого підходу відноситься простота розрахунку та можливість відокремлення визначальних параметрів, на які слід впливати для підвищення інтенсивності абсорбції небезпечних газів. З аналізу моделі (2.4)-(2.7) до таких параметрів можна віднести інтенсивність подачі дисперсного потоку води (або концентрацію крапель у одиниці об'єму C_{drop}), коефіцієнт поверхневого натягу абсорбенту σ та константу Генрі H . Відповідно окрім тактико-технічних заходів по збільшенню інтенсивності потоку, який подають рятувальники для осадження хмари небезпечного газу, ефективним шляхом є й модифікація властивостей води, що подається на осадження. До таких способів відноситься додавання поверхнево-активних речовин для зниження поверхневого натягу та додавання спеціальних розчинних нейтралізаторів, які здатні до активної хімічної реакції з газоподібною небезпечно хімічною речовиною. Це є особливо актуальним беручи до уваги данні таблиці 2.1, які демонструють суттєву відмінність по константі Генрі для різних небезпечних газів.

Звичайно таке спрощення моделі (2.4)-(2.7) може призвести до втрати точності результатів чисельного моделювання. Це потребує додаткової експериментальної перевірки. Для збільшення точності моделювання процесів сорбції на сьогодні використовують методи молекулярної динаміки [92] та метод Монте-Карло [93]. Це методи добре себе зарекомендували, але мають два суттєві недоліки, які ускладнюють їх використання в умовах ліквідації НС – це значний час машинного розрахунку та необхідність введення великої кількості вихідних параметрів. Зрозуміло, що час отримання необхідної інформації в умовах аварії відіграє критичне значення, також в таких умовах складно, а

часто й неможливо отримати велику кількість необхідних вхідних параметрів із достатнім рівнем точності. Це практично нівелює існуючі переваги методів молекулярної динаміки.

Аналіз рис. 2.2 встановив, що погана розчинність хлору Cl_2 у воді не дає значущої ефективності (6% у порівнянні з аміаком NH_3) його осадження дисперсними потоками навіть при максимальній інтенсивності, що підтверджує необхідність використання підрозділами ОРС ЦЗ водорозчинних нейтралізаторів, хімічно активних до реакції з хлором.

Слід відмітити логарифмічний характер залежності інтенсивності осадження досліджених небезпечних газів від інтенсивності подачі дисперсного потоку води. Це може пояснюватись тим, що інтенсивність сорбції падає внаслідок зниження концентрації небезпечних газів, яка в свою чергу знижується за рахунок протікання процесу абсорбції. Тому аналізуючи рис. 2.2 можна визначити критичну інтенсивність подачі дисперсного потоку чистої води при якій інтенсивність сорбції майже стабілізується: для соляної кислоти HCl $I_{\text{кр}} \approx 1,22 \text{ л(с}\cdot\text{м}^2)$, для діоксиду сірки SO_2 $I_{\text{кр}} \approx 1,52 \text{ л(с}\cdot\text{м}^2)$, для хлору Cl_2 $I_{\text{кр}} \approx 1,57 \text{ л(с}\cdot\text{м}^2)$, для дихлорангідриду вугільної кислоти (фосгену) COCl_2 $I_{\text{кр}} \approx 1,41 \text{ л(с}\cdot\text{м}^2)$.

Таким чином, запропоновано модель сорбції важких небезпечних газів дрібнодисперсним рідинним потоком. Розроблена математична модель дозволяє врахувати основні параметри сорбції, параметри навколишнього середовища, параметри рідинного потоку, що подається на осадження та фізико-хімічні властивості рідини у цьому потоці. Розроблена модель дозволяє мінімізувати кількість вхідних параметрів та час прогнозування, що є критично важливим для умов ліквідації НС. З аналізу результатів чисельного моделювання на прикладі газоподібного хлору встановлено, що при його осадженні визначальним параметром є константа Генрі, а не інтенсивність подачі рідинного потоку, як вважалось раніше. Це підтверджує нагальну потребу у використанні підрозділами ОРС ЦЗ хімічних нейтралізаторів при

ліквідації аварій із викидом такої газоподібної небезпечної хімічної речовини в атмосферу.

2.2. Математична модель прогнозування зони хімічного забруднення при викиді важких небезпечних газів

2.2.1. Математичний опис розповсюдження важких небезпечних газів за умов їх примусового осадження

Розглянемо модель умовного процесу розповсюдження хмари важкого небезпечного газу паралельно з процесом його осадження рідинним потоком (рис. 2.3).

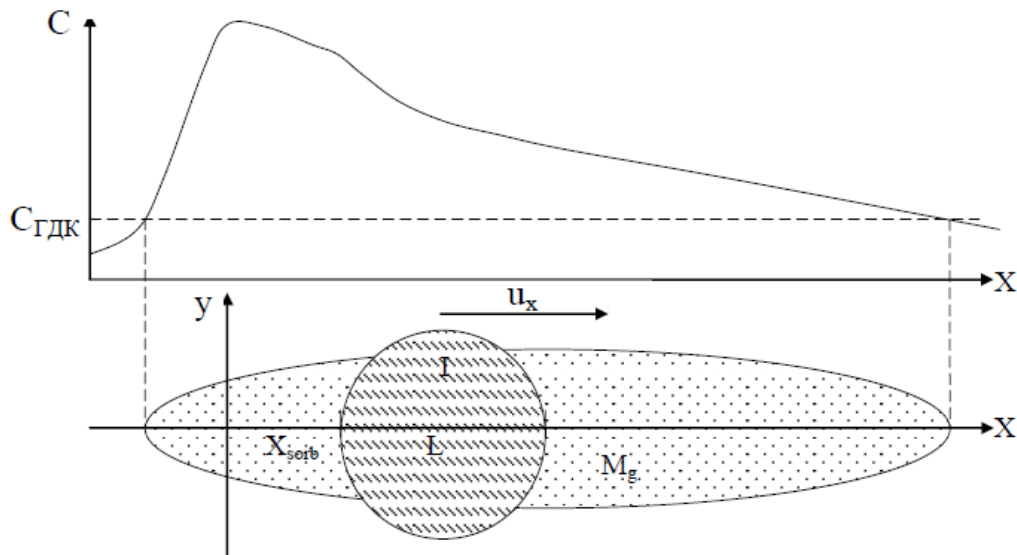


Рис. 2.3. Схема процесу осадження рідинним потоком хмари важкого небезпечного газу в атмосфері

Прийнемо точковий вигляд викиду важкого небезпечного газу (M_g) під тиском із технологічного апарату, який розгерметизувався. Витік здійснюється з інтенсивністю q . Хмара важкого небезпечного газу розповсюджується за вітром із поступовим зменшенням в ній концентрації C важкого небезпечного газу. Межею хмари приймаємо її концентрацію, яка відповідає ГДК ($C_{ГДК}$) для важкого небезпечного газу. Осадження здійснюється з довільною

інтенсивністю I з шириною зони осадження L , яка починається на довільній відстані від точки викиду X_{sorb} .

Припустимо, що точка початку координат співпадає з джерелом викиду важкого небезпечного газу (рис. 2.3). Тоді розповсюдження важкого небезпечного газу в повітрі внаслідок викиду описується рівнянням масопереносу [94, 95]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u_x C) + \frac{\partial}{\partial y}(u_y C) + \frac{\partial}{\partial z}(u_z C) + \sigma C = \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y}\right) + \\ + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_z \frac{\partial C}{\partial z}\right) + q\delta(x)\delta(y)\delta(z), \end{aligned} \quad (2.8)$$

де $C(x,y,z,t)$ – концентрація важкого небезпечного газу у точці (x,y,z) в момент часу t , кг/м^3 ;

$\sigma(x,y,z)$ – коефіцієнт, що враховує осадження важкого небезпечного газу;

(u_x, u_y, u_z) – вектор швидкості вітру;

μ_x, μ_y, μ_z – коефіцієнти турбулентної дифузії, $\text{м}^2/\text{с}$;

q – інтенсивність викиду важкого небезпечного газу, кг/с ;

$\delta(x)$ – δ -функція Дірака [96].

Якщо осадження важкого небезпечного газу відбувається в певній тривимірній області Ω , то коефіцієнт σ може бути представлений у вигляді:

$$\sigma(x, y, z) = \begin{cases} \sigma_0, & (x, y, z) \in \Omega; \\ 0, & (x, y, z) \notin \Omega. \end{cases}$$

$$\sigma = \frac{V_{\text{sorb}} \cdot M_g}{\rho_g}$$

де V_{sorb} – швидкість сорбції важкого небезпечного газу за певних параметрів сорбенту та атмосфери [94, 95];

M_g – молярна маса важкого небезпечного газу;

ρ_g – густина важкого небезпечного газу.

Коефіцієнти турбулентної дифузії в горизонтальному напрямку можуть бути визначені як:

$$\mu_x \approx \mu_y = k_0 u,$$

де $k_0 = (0,1 \div 1)$ м;

$$u = \sqrt{u_x^2 + u_y^2}.$$

Коефіцієнт турбулентної дифузії у вертикальному напрямку залежить від стану атмосфери і описується залежністю:

$$\mu_z = k_1 \left(\frac{z}{z_1} \right)^m,$$

де $k_1 = (0,1 \div 0,2)$ м²/с; $m \approx 1$.

Особливістю розповсюдження важкого небезпечного газу є те, що його густина є більшою за густина повітря (наприклад, густина хлору Cl_2 ($\rho_{\text{cl}} = 3,21$ кг/м³) в 2,6 рази більша за густина повітря ($\rho_a = 1,23$ кг/м³) [57]). Внаслідок цього важкий небезпечний газ не розсіюється вгору, а опускається донизу.

Оскільки типові швидкості руху повітряних мас (10 м/с) є значно меншими від швидкості звуку в повітрі (343 м/с при температурі 20⁰С [96]), то це дозволяє вважати газове середовище нестисливим. В цьому випадку рівняння Нав'є-Стокса [98] можуть бути записані у вигляді:

$$\frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_x}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_{\text{cl}}} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \right); (2.9)$$

$$\frac{\partial u_y}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_y}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_{cl}} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} \right); \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_z}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_z}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_z}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_{cl}} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) - \\ - \frac{\rho_{cl} - \rho}{\rho_{cl}} g, \end{aligned} \quad (2.11)$$

де P – відхилення тиску від величини атмосферного тиску P_0 ;

ν – кінематична в'язкість, m^2/s ;

g – прискорення вільного падіння;

$\rho(x,y,z,t)$ – густина суміші повітря та важкого небезпечного газу в заданій точці:

$$\rho = C + \rho_a \left(1 - \frac{C}{\rho_{cl}} \right). \quad (2.12)$$

Припустимо, що вітер має постійну швидкість і напрямок ($u_x = \text{const}$, $u_y = \text{const}$), а тиск однаковий у всій області, що досліджується. Тоді рівняння Нав'є-Стокса (2.9)-(2.11) спрощуються та мають вигляд:

$$\frac{\partial u_z}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_z}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_z}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} = \nu \left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) - \frac{\rho_{cl} - \rho}{\rho_{cl}} g. \quad (2.13)$$

Таким чином, розповсюдження важкого небезпечного газу в повітрі описується системою двох диференціальних рівнянь (2.8) та (2.13) з умовою (2.12). Початковою умовою є відсутність важкого небезпечного газу в повітрі в момент початку його витікання:

$$C(x, y, z, 0) = 0, \quad (2.14)$$

а крайовою умовою на поверхні землі – її непроникність для важкого небезпечного газу:

$$\frac{\partial}{\partial z} C(x, y, 0, t) = 0. \quad (2.15)$$

Отримані вирази (2.8)–(2.14) дозволяють визначати динаміку хмари важкого небезпечного газу в атмосфері при її активному осадженні.

2.2.2. Розробка методики чисельного розв'язання побудованих моделей

При застосуванні аналітичного методу розв'язання моделі (2.8)–(2.14) виникає проблема багатокаскадного інтегрування, тому нами запропоновано використати чисельний метод скінчених різниць [99].

Метод скінчених різниць дозволяє математично описати закономірності розповсюдження хмари важкого небезпечного газу у вигляді паралелепіпеда:

$$\Omega = [a_x, b_x] \times [a_y, b_y] \times [0, b_z],$$

за межами якого концентрація важкого небезпечного газу не буде перевищувати $C_{ГДК}$ (наприклад для хлору Cl_2 $C_{ГДК}=2$ мг/м³ [57]).

Розглянемо рівняння (2.8)–(2.14) у скінченному об'ємі Ω . Доповнимо умови (2.14) та (2.15) крайовими умовами 1-го роду на гранях паралелепіпеду:

$$C(a_x, y, z, t) = C(b_x, y, z, t) = 0,$$

$$C(x, a_y, z, t) = C(x, b_y, z, t) = 0,$$

$$C(x, y, b_z, t) = 0.$$

На рис. 2.4 побудовано тривимірну регулярну сітку в області Ω з кроком h за умови, що один з її вузлів знаходиться в точці викиду важкого небезпечного газу (точці початку координат).

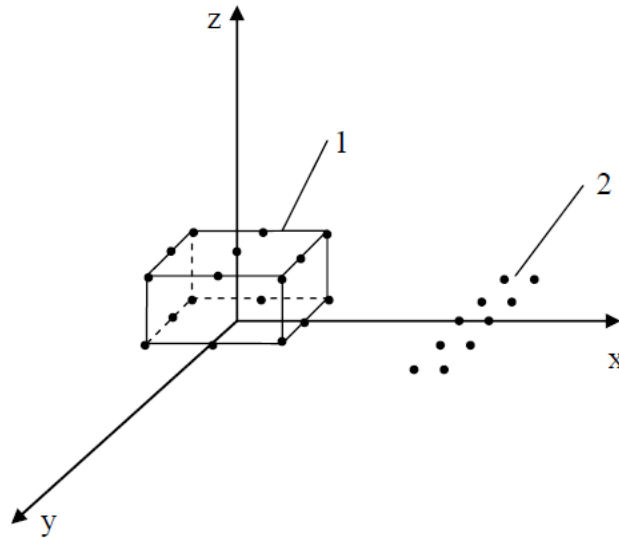


Рис. 2.4. Тривимірний регулярна сітка в області Ω розповсюдження важкого небезпечного газу з кроком h (1 – паралелепіпед з точок, що є сусідніми з точкою викиду, 2 – вузли сітки, де здійснюється осадження важкого небезпечного газу).

На рис. 2.4 у вузлах сітки навколо точки викиду важкого небезпечного газу вважаємо її концентрацію рівною $C_{\infty}(x, y, z)$:

$$C(x, y, z, t) = C_{\infty}(x, y, z).$$

У внутрішніх вузлах сітки диференціальне рівняння (2.8) замінимо на рівняння у скінчених різницях. В точці викиду важкого небезпечного газу й у вузлах навколо неї заміну не здійснюємо. Апроксимуємо частинні похідні наступними виразами:

$$\frac{\partial C}{\partial t} \approx \frac{C(x_i, y_j, z_k, t_{m+1}) - C(x_i, y_j, z_k, t_m)}{\Delta t},$$

де Δt – крок вздовж вісі часу.

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial x} &\approx \frac{\Delta_x C}{h} = \frac{C(x_{i+1}, y_j, z_k, t_m) - C(x_i, y_j, z_k, t_m)}{h}, \\ \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} &\approx \frac{\Delta_{xx} C}{h^2} = \frac{C(x_{i+1}, y_j, z_k, t_m) + C(x_{i-1}, y_j, z_k, t_m) - 2C(x_i, y_j, z_k, t_m)}{h^2}, \\ \frac{\partial C}{\partial y} &\approx \frac{\Delta_y C}{h} = \frac{C(x_i, y_{j+1}, z_k, t_m) - C(x_i, y_j, z_k, t_m)}{h}, \\ \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} &\approx \frac{\Delta_{yy} C}{h^2} = \frac{C(x_i, y_{j+1}, z_k, t_m) + C(x_i, y_{j-1}, z_k, t_m) - 2C(x_i, y_j, z_k, t_m)}{h^2}, \\ \frac{\partial C}{\partial z} &\approx \frac{\Delta_z C}{h} = \frac{C(x_i, y_j, z_{k+1}, t_m) - C(x_i, y_j, z_k, t_m)}{h}, \\ \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} &\approx \frac{\Delta_{zz} C}{h^2} = \frac{C(x_i, y_j, z_{k+1}, t_m) + C(x_i, y_j, z_{k-1}, t_m) - 2C(x_i, y_j, z_k, t_m)}{h^2}. \end{aligned}$$

Рівняння (2.8) у скінченних різницях отримає наступний вигляд:

$$\frac{\Delta_\tau C}{\Delta t} = a \left(\frac{\Delta_{xx} C}{h^2} + \frac{\Delta_{yy} C}{h^2} + \frac{\Delta_{zz} C}{h^2} \right) - v_x \frac{\Delta_x C}{h} - \sigma(x, y, z)C. \quad (2.16)$$

З рівняння (2.16) видно, що збільшення в часі концентрації в точці (x_i, y_j, z_k) характеризується рівнянням:

$$\Delta_\tau C = a \frac{\Delta t}{h^2} (\Delta_{xx} C + \Delta_{yy} C + \Delta_{zz} C) - v_x \frac{\Delta t}{h} \Delta_x C - \sigma(x, y, z)C \Delta t, \quad (2.17)$$

з якого можна розрахувати концентрації в точках сітки в момент часу $(t + \Delta t)$:

$$C(x_i, y_j, z_k, t + \Delta t) = C(x_i, y_j, z_k, t) + \Delta_\tau C. \quad (2.18)$$

Отримані рівняння (2.17) та (2.18) дають можливість розрахувати у вузлах сітки величини концентрації важкого небезпечного газу у будь-який момент часу t .

Для стійкого збігу процесу ітерації рівнянь (2.17) та (2.18) необхідно, щоб кроки вздовж осей часу та координат задовольняли умові Куранта-Фрідрихса-Леві [100]:

$$\Delta t \leq \frac{h^2}{6a}. \quad (2.19)$$

Рівняння (2.8)–(2.14) є результатом розв'язання системи рівнянь Нав'є-Стокса за умов розповсюдження потоку з більшою густиною ніж середовище в якому це розповсюдження відбувається. Враховуючи, що концентрація важкого небезпечного газу зменшується від максимальної у точці викиду до нескінченно малого значення у просторі розповсюдження, то запропоновано ввести поняття межі зони розповсюдження, критерієм якою є ГДК важкого небезпечного газу (рис. 2.3).

З метою урахування процесу осадження запропоновано здійснювати поетапне розбиття зони хімічного зараження, що дозволяє використовувати спрощену модель для розрахунку із додаванням інтенсивності сорбції важкого небезпечного газу на етапі його осадження. У цьому випадку місце розташування та розміри зони осадження можна вважати довільними. Це є особливо важливим для гнучкості використання теоретичних результатів для розв'язання прикладних задач. Так, наприклад, у випадку розгляду ситуації із стаціонарною водяною завісою на технологічних отворах реалізується випадок вузької $(0,1 \div 0,2\text{м})$ зони осадження у безпосередній близькості до осередку

викиду (менше 3 м). Однак при розгляді процесу роботи підрозділів ОРС ЦЗ з мобільними розпилюючими пристроями (пожежними стволами) ситуація протилежна – ширина зони осадження є більшою ніж 10 м із відстанню від джерела викиду більш ніж 5 м, так як робота рятувальників у безпосередній близькості до джерела є небезпечною для життя та здоров'я.

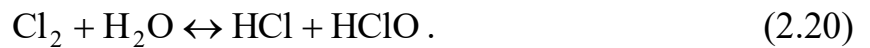
При моделюванні етапу осадження вирішальним є коефіцієнт σ , який визначається інтенсивністю сорбції важкого небезпечного газу дисперсним потоком чистої води. Саме в цьому коефіцієнті враховується хімічна природа важкого небезпечного газу та рідини осадження, дисперсність та інтенсивність потоку осадження та параметри середовища в якому протікає процес сорбції.

Таким чином, побудовано математичну модель дифузійного розповсюдження в атмосфері важких небезпечних газів за умови паралельного протікання процесу їх примусового осадження дрібнодисперсним потоком рідини. Модель створено шляхом розв'язання рівнянь Нав'є-Стокса з відповідними граничними умовами. Особливістю побудованої моделі є врахування під час розповсюдження важких небезпечних газів процесу його примусового осадження дрібнодисперсним потоком рідини різної інтенсивності. При цьому осадження відбувається за рахунок процесів сорбції важкого небезпечного газу краплинами рідини. Модель дозволяє прогнозувати величину зони хімічного ураження при викиді важких небезпечних газів при їх активному осадженні стаціонарними та мобільними розпилювачами.

2.3. Кінетика хімічної нейтралізації дрібнодисперсним рідинним потоком важких небезпечних газів

2.3.1. Дослідження активності хімічної нейтралізації хлору при додаванні нейтралізаторів до дрібнодисперсного потоку води при осадженні

Як наведено в параграфі 1.2.1 найпростішим методом нейтралізації хлору Cl_2 є його осадження за допомогою потоку дрібнодисперсної води, що здійснюється відповідними стволами. При $10\text{ }^\circ\text{C}$ та атмосферному тиску один літр води нейтралізує до 3,10 л газоподібного хлору, при $30\text{ }^\circ\text{C}$ та атмосферному тиску один літр води нейтралізує до 1,77 л газоподібного хлору [57]. Процес нейтралізації супроводжується хімічною реакцією:



Утворюються соляна (хлоридна) кислота HCl , яка за силою є сильною кислотою [101], та хлорнуватиста кислота HClO , яка за силою є слабкою кислотою [102]. Властивості кислоти залежать від її концентрації у водному розчині. Концентрованою вважається соляна кислота, що містить 37% HCl у воді. Хлорнуватиста кислота є нестійкою й розкладається у водному розчині на соляну кислоту та атомарний кисень:



Раніше було наведено, що збільшення інтенсивності подачі дрібнодисперсного потоку чистої води при осадженні хлору з атмосфери не дозволяє досягти навіть середніх показників інтенсивності нейтралізації у порівнянні з іншими газоподібними небезпечними хімічними речовинами. Зокрема, при інтенсивності подачі 2 л/с/м^2 потоку чистої води з дисперсністю крапель 1 мкм інтенсивність нейтралізації хлору складає $3,0 \cdot 10^3\text{ моль/с/м}^3$. Також встановлено, що при інтенсивності подачі дрібнодисперсного потоку

чистої води більше від $I_w = 1,57 \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$, інтенсивність нейтралізації хлору практично не збільшується. Це пов'язано із непропорційно низькою величиною константи Генрі Н хлору у порівнянні з іншими небезпечними газами. Константа Генрі хлору менша ніж константа Генрі аміаку NH_3 у 290 разів, парів соляної кислоти HCl – у 204 рази, парів дихлорангідрид вугільної кислоти (фосген) COCl_2 – у 118 разів, парів синильної кислоти (ціанід водню) HCN – у 80 разів [89]. Як наслідок, хлор має низьку розчинність у воді у порівнянні, наприклад, з аміаком.

Для збільшення інтенсивності нейтралізації хлору до води додаються хімічно-активні речовини – сполуки лужних металів натрію, калію та кальцію (гідроксид натрію NaOH , гідроксид калію KOH , карбонат натрію Na_2CO_3 , гідроксид кальцію $\text{Ca}(\text{OH})_2$, сульфат натрію Na_2SO_3 , тіосульфат натрію $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$), а також хлорид заліза FeCl_2 та перекис водню H_2O_2 [37, 90].

Розглянемо більш детально хімічні реакції нейтралізації хлору за допомогою дрібнодисперсного потоку води з переліченими нейтралізаторами.

Для нейтралізатору водний розчин розчину гідроксиду натрію:



енергія Гіббса (термодинамічний потенціал [103]) системи $\Delta G = -524,11 \text{ кДж} / \text{кг}$.

Утворений при цьому гіпохлорит натрію звичайно розкладається з утворенням хлориду натрію та кисню:



Для нейтралізатору водний розчин гідроксиду калію:



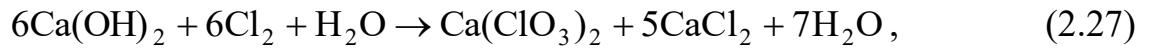
енергія Гіббса системи $\Delta G = -223,24$ кДж / кг .

Для нейтралізатору водний розчин карбонату натрію:



енергія Гіббса системи $\Delta G = 801,1$ кДж / кг .

Для нейтралізатору водний розчин гідроксиду кальцію:



енергія Гіббса системи $\Delta G = -795,19$ кДж / кг .

Для нейтралізатору водний розчин сульфіту натрію:



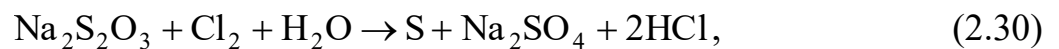
енергія Гіббса системи $\Delta G = -294,56$ кДж / кг .

або



енергія Гіббса системи $\Delta G = -217,33$ кДж / кг .

Для нейтралізатору водний розчин тіосульфату натрію:



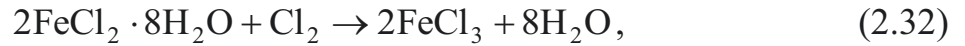
енергія Гіббса системи $\Delta G = -1087,46$ кДж / кг .

або



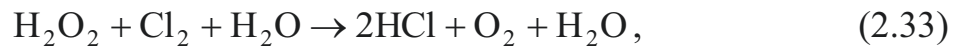
енергія Гіббса системи $\Delta G = -1299,1$ кДж / кг .

Для нейтралізатору водний розчин хлориду заліза:



енергія Гіббса системи $\Delta G = -272,0$ кДж / кг .

Для нейтралізатору водний розчин перекису водню:



енергія Гіббса системи $\Delta G = -70,18$ кДж / кг .

Енергія Гіббса ΔG реакції є показником активності хімічної реакції. Тому при відповідності решти параметрів процесу сорбції по цьому показнику можна оцінювати активність нейтралізаторів. На рис. 2.5 для порівняння наведена величина енергії Гіббса ($-\Delta G$) для основних видів нейтралізаторів хлору.

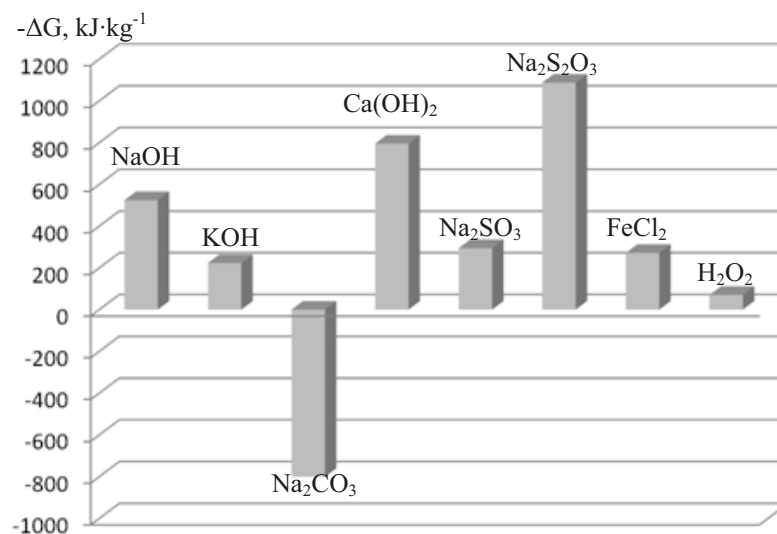


Рис. 2.5. Величина енергії Гіббса ($-\Delta G$) для основних видів нейтралізаторів хлору

2.3.2. Моделювання та дослідження кінетики процесу нейтралізації хлору дрібнодисперсним потоком води з хімічним нейтралізатором

В присутності хімічної реакції абсорбенту з абсорбатом для розрахунку швидкості V_{sorb} абсорбції хлору Cl_2 є некоректним використання рівняння (2.7):

$$V_{\text{sorb}} = I_{\text{coll}} \cdot \theta_{\text{sorb}} \cdot \alpha \cdot \sqrt{\frac{D_{\text{drop}}}{\pi \tau}}, \quad (2.34)$$

де I_{coll} – частота зіткнень молекул хлору Cl_2 з поверхнею краплі (розраховується за формулою (2.4)),

θ_{sorb} – коефіцієнт насичення поверхневого шару води абсорбованим газом (розраховується за формулою (2.6)),

α – коефіцієнт акомодатії,

D_{drop} – коефіцієнт дифузії краплини дрібнодисперсного потоку,

τ – характерний час процесу,

В таких випадках необхідним є врахування швидкості V_{react} хімічної реакції, яка розраховується за стандартним рівнянням хімічної кінетики:

$$V_{\text{react}} = k \cdot C_A^a \cdot C_B^b, \quad (2.35)$$

де k – константа швидкості реакції,

C_A та C_B – молярні концентрації реагентів А та В,

a та b – кінетичний порядок реакції по речовині А та В відповідно.

З урахуванням енергії Гіббса ΔG константа швидкості реакції k визначається як:

$$k = \exp\left(\frac{\Delta G}{R \cdot T}\right). \quad (2.36)$$

З урахуванням рівнянь (2.35) та (2.36) рівняння (2.34) для розрахунку швидкості V_{sorb} абсорбції газу дрібнодисперсним потоком води з нейтралізатором можна записати наступним чином:

$$V_{\text{sorb}} = I_{\text{coll}} \cdot \theta_{\text{sorb}} \cdot \alpha \cdot \sqrt{D_{\text{drop}} \cdot V_{\text{react}}}. \quad (2.37)$$

На рис. 2.6 показана кінетика швидкості V_{sorb} абсорбції газоподібного хлору Cl_2 в залежності від інтенсивності I_w подачі водного розчину нейтралізатора гідроксид натрію NaOH та його концентрації C_{NaOH} у воді, розраховані за формулою (2.37). Дисперсність потоку прийнята рівною 1 мкм.

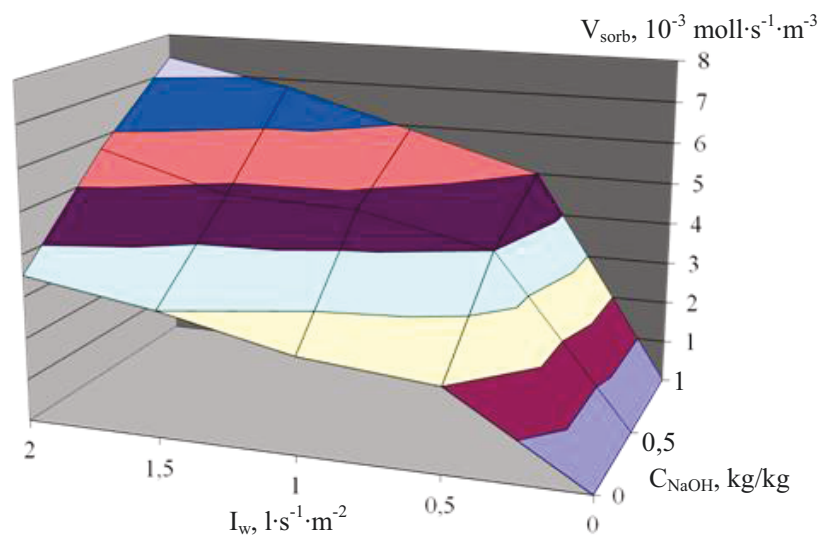


Рис. 2.6. Кінетика швидкості V_{sorb} абсорбції газоподібного хлору Cl_2 в залежності від інтенсивності I_w подачі водного розчину нейтралізатора гідроксид натрію та концентрації C_{NaOH} цього нейтралізатора у воді.

2.3.3. Результати моделювання кінетики процесу нейтралізації хлору дрібнодисперсним потоком води з хімічним нейтралізатором

Проведений аналіз активності хімічних нейтралізаторів, що додаються до дрібнодисперсного потоку води, довів, що вони мають різну активність при хімічній реакції з хлором.

Низьку активність при реакції з хлором мають нейтралізатори гідроксид калію KOH, сульфід натрію Na_2SO_3 , хлорид заліза FeCl_2 та перекис водню H_2O_2 . Також в результаті хімічної реакції нейтралізації при використанні цих речовин утворюється хімічно сильна соляна кислота HCl.

Найбільшу хімічну активність до хлору має тіосульфат натрію $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, однак, як наведено вище, водний розчин даної речовини з хлором реагує з утворення відразу двох сильних кислот – сірчаної H_2SO_4 та соляної HCl. Відповідно при осадженні газоподібного хлору з атмосфери такими розчинами може відбутися екологічне забруднення ґрунту. В деяких випадках це може призвести до виникнення небезпеки для рятувальників, які знаходяться у безпосередній близькості до зони осадження й можуть контактувати з рідиною, що розтікається по поверхні після осадження. Крім цього сірчана H_2SO_4 та соляна HCl кислоти призводять до пошкодження рятувального обладнання – пожежних автомобілів та пожежно-технічного обладнання, що задіяне для ліквідації аварії.

Таким чином, для практичного використання підрозділами ОРС ЦЗ слід рекомендувати використання двох хімічних нейтралізаторів хлору – гідроксиду натрію NaOH або гідроксиду кальцію $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Як видно з рівнянь (3.3)-(3.5) хімічних реакцій при взаємодії гідроксиду натрію NaOH з хлором утворюється хлорат натрію NaClO, який у подальшому розкладається з утворенням малоактивної солі хлорид натрію NaCl (поварена сіль). З рівняння (2.27) видно, що при хімічній реакції гідроксиду кальцію $\text{Ca}(\text{OH})_2$ з хлором утворюється малоактивна сіль хлорид кальцію CaCl_2 (морська сіль).

Різну активність хімічних нейтралізаторів, що додаються до дрібнодисперсного потоку води при хімічній реакції з хлором Cl_2 , можна пояснити різними хімічними властивостями досліджених нейтралізаторів.

Особливістю запропонованого методу моделювання процесу нейтралізації хлору Cl_2 дрібнодисперсним потоком води з хімічним нейтралізатором є застосування стандартного рівняння хімічної кінетики для розрахунку швидкості хімічної реакції у методі моделювання процесу нейтралізації хлору дрібнодисперсним потоком чистої води. Внаслідок цього підвищується адекватність моделювання для випадку застосування хімічних нейтралізаторів при відносно незначному ускладненні чисельного розрахунку.

На рис. 2.6 показана кінетика швидкості V_{sorb} абсорбції газоподібного хлору Cl_2 в залежності від інтенсивності I_w подачі водного розчину нейтралізатора гідроксид натрію та концентрації C_{NaOH} нейтралізатора у воді. Видно, що швидкість V_{sorb} абсорбції газоподібного хлору Cl_2 при його осадженні дрібнодисперсним потоком води без домішок зростає зі зростанням інтенсивності I_w його подачі. При зростанні інтенсивності I_w подачі дрібнодисперсного потоку чистої води від 0 до $I_w = 0,5 \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ спостерігається зростання швидкості V_{sorb} абсорбції газоподібного хлору від 0 до $V_{\text{sorb}} = 2,0 \text{ моль}/(\text{с} \cdot \text{м}^3)$. Подальше зростання інтенсивності I_w подачі дрібнодисперсного потоку чистої води до значення $I_w = 1,57 \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ призводить до менш швидкого зростання швидкості V_{sorb} абсорбції газоподібного хлору до величини $V_{\text{sorb}} = 3,0 \text{ моль}/(\text{с} \cdot \text{м}^3)$. При інтенсивності подачі дрібнодисперсного потоку чистої води більше ніж $I_w = 1,57 \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$, інтенсивність нейтралізації хлору Cl_2 практично не зростає, що підтверджує відповідність побудованої моделі нейтралізації результатам попередніх досліджень [104].

Додавання нейтралізатору гідроксид натрію NaOH до дрібнодисперсного потоку води веде до зростання швидкості V_{sorb} абсорбції газоподібного хлору

Cl_2 в усьому діапазоні зміни інтенсивності I_w подачі дрібнодисперсного потоку води з нейтралізатором з динамікою, що є подібною випадку нейтралізації чистою водою.

При концентрації $C_{\text{NaOH}} = 0,5$ кг/кг гідроксиду натрію у воді відбувається зростання швидкості V_{sorb} абсорбції газоподібного хлору Cl_2 . При зростанні інтенсивності I_w подачі дрібнодисперсного потоку води з нейтралізатором від 0 до $I_w = 0,6$ л/(с · м²) спостерігається зростання швидкості V_{sorb} абсорбції газоподібного хлору Cl_2 від 0 до $V_{\text{sorb}} = 4,0$ моль/(с · м³). Подальше зростання інтенсивності I_w подачі дрібнодисперсного потоку води з нейтралізатором до значення $I_w = 1,6$ л/(с · м²) призводить до менш швидкого зростання швидкості V_{sorb} абсорбції газоподібного хлору Cl_2 до величини $V_{\text{sorb}} = 5,0$ моль/(с · м³). При інтенсивності подачі дрібнодисперсного потоку води з нейтралізатором більше ніж $I_w = 1,6$ л/(с · м²) інтенсивність нейтралізації хлору Cl_2 зростає менш інтенсивно до величини $V_{\text{sorb}} = 5,8$ моль/(с · м³) при $I_w = 2,0$ л/(с · м²).

При концентрації $C_{\text{NaOH}} = 1,0$ кг/кг гідроксиду натрію у воді відбувається ще більш інтенсивне зростання швидкості V_{sorb} абсорбції газоподібного хлору Cl_2 . При зростанні інтенсивності I_w подачі дрібнодисперсного потоку води з нейтралізатором від 0 до $I_w = 0,7$ л/(с · м²) спостерігається зростання швидкості V_{sorb} абсорбції газоподібного хлору Cl_2 від 0 до $V_{\text{sorb}} = 5,0$ моль/(с · м³). Подальше зростання інтенсивності I_w подачі дрібнодисперсного потоку води з нейтралізатором до значення $I_w = 1,7$ л/(с · м²) призводить до менш швидкого зростання швидкості V_{sorb} абсорбції газоподібного хлору Cl_2 до величини $V_{\text{sorb}} = 6,8$ моль/(с · м³). При інтенсивності подачі дрібнодисперсного потоку води з нейтралізатором більше ніж $I_w = 1,7$ л/(с · м²) інтенсивність нейтралізації хлору зростає менш інтенсивно до величини $V_{\text{sorb}} = 7,4$ моль/(с · м³) при $I_w = 2,0$ л/(с · м²).

Таким чином можна зробити висновок, що інтенсивність I_w подачі дрібнодисперсного потоку як чистої води, так і з нейтралізатором гідроксид натрію NaOH доцільно обмежити величинами $I_w = 1,5 \div 1,7$ л/(с · м²). Це пояснюється тим, що при подальшому зростанні I_w швидкість V_{sorb} абсорбції газоподібного хлору Cl₂ зростає незначно. Зростання концентрації C_{NaOH} нейтралізатору у воді веде до значного зростання швидкості V_{sorb} абсорбції газоподібного хлору. Так при максимально дослідженій інтенсивності $I_w = 2,0$ л/(с · м²) подачі дрібнодисперсного потоку швидкість V_{sorb} абсорбції газоподібного хлору Cl₂ зростає від $V_{\text{sorb}} = 3,0$ моль/(с · м³) для дрібнодисперсного потоку чистої води до $V_{\text{sorb}} = 5,8$ моль/(с · м³) для дрібнодисперсного потоку води з нейтралізатором гідроксид натрію NaOH в концентрації $C_{\text{NaOH}} = 0,5$ кг/кг (у 1,9 разів) й до $V_{\text{sorb}} = 7,4$ моль/(с · м³) для дрібнодисперсного потоку води з нейтралізатором гідроксид натрію NaOH в концентрації $C_{\text{NaOH}} = 1,0$ кг/кг (у 2,4 рази).

Таким чином, при проведенні дослідження хімічної активності нейтралізаторів гідроксид натрію, гідроксид калію, карбонат натрію, гідроксид кальцію, сульфід натрію, тіосульфат натрію, хлорид заліза та перекис водню, що можуть додаватися до дрібнодисперсного потоку води, встановлено, що вони мають різну активність при хімічній реакції з хлором. Побудовано математичну модель нейтралізації хлору дрібнодисперсним потоком води з хімічним нейтралізатором. В основу моделі покладено припущення, що при хімічній нейтралізації хлору з дрібнодисперсним потоком води з нейтралізатором, швидкість хімічної реакції розраховується за стандартним рівнянням хімічної кінетики.

Висновки до розділу 2

1. Запропонована модель сорбції важких небезпечних газів дрібнодисперсним рідинним потоком. Розроблена математична модель дозволяє врахувати основні параметри сорбції, параметри навколишнього середовища, параметри рідинного потоку, що подається на осадження та фізико-хімічні властивості рідини у цьому потоці. Розроблена модель дозволяє мінімізувати кількість вхідних параметрів та час прогнозування, що є критично важливим для умов ліквідації НС. З аналізу результатів чисельного моделювання на прикладі газоподібного хлору встановлено, що при його осадженні визначальним параметром є константа Генрі, а не інтенсивність подачі рідинного потоку, як вважалось раніше. Це підтверджує нагальну потребу у використанні підрозділами ОРС ЦЗ хімічних нейтралізаторів при ліквідації аварій із викидом такої газоподібної небезпечної хімічної речовини в атмосферу.

2. Побудовано математичну модель дифузійного розповсюдження в атмосфері важких небезпечних газів за умови паралельного протікання процесу їх примусового осадження дрібнодисперсним потоком рідини. Модель створено шляхом розв'язання рівнянь Нав'є-Стокса з відповідними граничними умовами. Особливістю побудованої моделі є врахування під час розповсюдження важких небезпечних газів процесу його примусового осадження дрібнодисперсним потоком рідини різної інтенсивності. При цьому осадження відбувається за рахунок процесів сорбції важкого небезпечного газу краплинами рідини. Модель дозволяє прогнозувати величину зони хімічного ураження при викиді важких небезпечних газів при їх активному осадженні стаціонарними та мобільними розпилювачами.

3. При проведенні дослідження хімічної активності нейтралізаторів гідроксид натрію, гідроксид калію, карбонат натрію, гідроксид кальцію, сульфат натрію, тіосульфат натрію, хлорид заліза та перекис водню, що можуть додаватися до дрібнодисперсного потоку води, встановлено, що вони мають

різну активність при хімічній реакції з хлором. Для практичного використання доцільно використання хімічних нейтралізаторів хлору гідроксид натрію або гідроксид кальцію. Внаслідок хімічних реакцій водних розчинів гідроксиду натрію та гідроксиду кальцію з хлором утворюються малоактивні хлорид натрію та хлорид кальцію. Побудовано математичну модель нейтралізації хлору дрібнодисперсним потоком води з хімічним нейтралізатором. В основу моделі покладено припущення, що при хімічній нейтралізації хлору з дрібнодисперсним потоком води з нейтралізатором, швидкість хімічної реакції розраховується за стандартним рівнянням хімічної кінетики. Це дозволило побудувати на основі моделі нейтралізації хлору дрібнодисперсним потоком чистої води модель хімічної нейтралізації хлору дрібнодисперсним потоком з нейтралізатором. При дослідженій інтенсивності $2,0 \text{ л}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$ подачі дрібнодисперсного потоку та при концентрації $0,5 \text{ кг}/\text{кг}$ гідроксиду натрію у воді швидкість нейтралізації газоподібного хлору зростає на 90% , а при концентрації $1,0 \text{ кг}/\text{кг}$ – на 140% . Тому при хімічній нейтралізації (осадженні) газоподібного хлору дрібнодисперсним потоком води з добавкою гідроксид натрію доцільно використання насичених розчинів.

РОЗДІЛ 3.

РОЗРОБКА МЕТОДУ ПРОГНОЗУВАННЯ ЗОНИ ХІМІЧНОГО ЗАБРУДНЕННЯ ПРИ ВИКИДІ ВАЖКИХ НЕБЕЗПЕЧНИХ ГАЗІВ

Розроблено алгоритм реалізації методу прогнозування зони хімічного забруднення при викиді важких небезпечних газів.

Проведено перевірку працездатності методу прогнозування зони хімічного забруднення при викиді важких небезпечних газів. Для цього запропоновано та створено експериментальну лабораторну установку, яка дозволяє проводити дослідження динаміки розповсюдження важких небезпечних газів під впливом дисперсних потоків та імітації повітря та методикою проведення таких досліджень. На даній установці проведено експериментальну перевірку адекватності математичних моделей осадження важких небезпечних газів дисперсним потоком. Перевірку ефективності методу прогнозування зони хімічного забруднення при викиді важких небезпечних газів проведено шляхом порівняння із офіційною методикою прогнозування.

З метою практичного впровадження проведено програмну реалізацію методу нейтралізації важких небезпечних газів дрібнодисперсним рідинним потоком.

Основні результати розділу викладені в публікаціях [13, 18-20].

3.1. Розробка алгоритму реалізації методу прогнозування зони хімічного забруднення при викиді важких небезпечних газів

В першому розділі встановлено, що на сьогодні не існує універсального алгоритму та програми прогнозування зони хімічного забруднення при викиді важких небезпечних газів, які би враховували усі особливості його розвитку.

Ліквідація аварій на ХНО повинна включати в себе наступні етапи управління – моніторинг ситуації, що сталася, прогнозування можливих наслідків, прийняття управлінського рішення та вплив на аварію з метою її

ліквідації [105]. Правильність прийнятого управлінського рішення безпосередньо залежить від правильності прогнозування розвитку НС [106].

З метою інтеграції розроблених математичних моделей динаміки важких небезпечних газів в практичну діяльність в роботі запропоновано алгоритм прогнозування інтенсивності сорбції важких небезпечних газів, що викидаються в атмосферу внаслідок аварії (рис. 3.1).

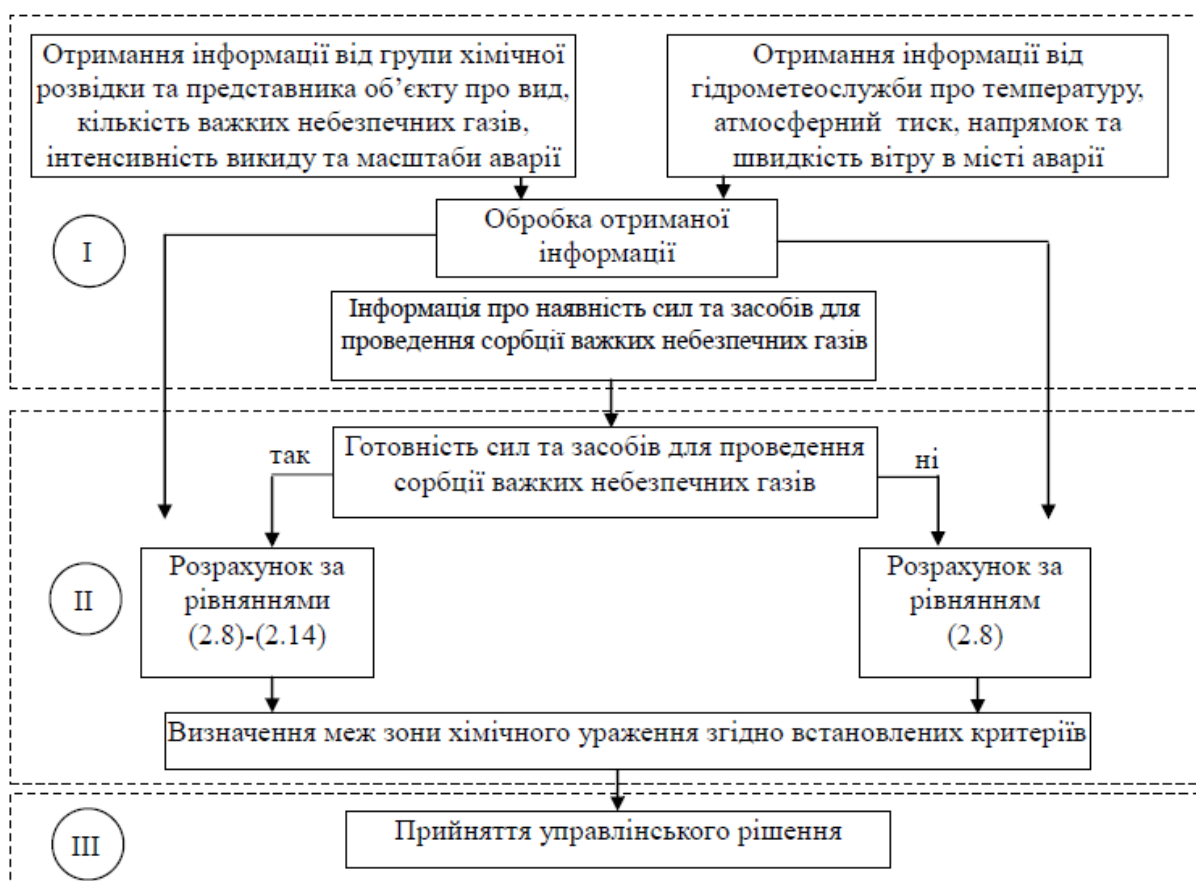


Рис. 3.1. Алгоритм прогнозування інтенсивності сорбції важких небезпечних газів, що викидаються в атмосферу внаслідок аварії

При локалізації аварії визначаються наступні параметри осадження: інтенсивність подачі рідини-сорбенту, дисперсність рідини-сорбенту та можливі розміри зони осадження. При цьому провадиться прогнозування розмірів зони ураження при відсутності та наявності сорбції важких небезпечних газів. У випадку відсутності сорбції прогнозування проводиться за формулою (2.8).

Після розрахунку розмірів зони хімічного забруднення та нанесення границь небезпечної зони на карту керівник ліквідації аварії приймає управлінське рішення про методи ліквідації аварії та необхідність евакуації населення та матеріальних цінностей.

Запропонований алгоритм складається з 9 блоків, розміщених на трьох рівнях, поєднаних прямими зв'язками.

На першому рівні знаходиться 4 блоки. Спочатку отримується та систематизується інформація про аварію від наявних засобів автоматичної сигналізації, від представника об'єкту особи або від групи хімічної розвідки. Для проведення якісного прогнозування зон хімічного забруднення необхідно отримати точну інформацію про основні метеорологічні параметри від гідрометеослужби. Також керівник ліквідації аварії повинен володіти даними про наявні у розпорядження сили та засоби для проведення сорбції важких небезпечних газів. На другому рівні приводиться розрахунок розмірів зон хімічного забруднення. Для цього керівник ліквідації аварії повинен визначитись з критерієм безпеки. В якості критерію безпеки зазвичай обирають ГДК важких небезпечних газів.

Після чого керівник ліквідації аварії визначається з можливістю проведення сорбції хмари важких небезпечних газів (третій рівень).

Одним з недоліків запропонованої моделі є припущення, що сорбція хмари важких небезпечних газів відбувається по всій глибині та висоті хмари. Тобто граничними умовами використання моделі є технічні можливості підрозділів ОРС ЦЗ для подавання розпиленої води (сорбенту). Технічні можливості по дальності подачі дрібнодисперсного струменю для лафетних стволів становить до 40 м. Тобто при використанні двох лафетних стволів на протилежних сторонах хмари важкого небезпечного газу глибина зони сорбції може складати до 80 м. Якщо розглядати технічні можливості по висоті подачі розпиленого струменю сорбенту, то необхідно брати до уваги два варіанти подачі струменю – наземний та з використанням підіймачів. Наземний спосіб подачі розпиленого струменю сорбенту здатен забезпечити висоту до 20 м.

Використання механічних підіймачів дозволяє збільшити висоту подачі струменю сорбенту до 50 м. Тобто розміри зони хімічного ураження для можливості використання запропонованої моделі для прогнозування її розмірів повинні знаходитись в межах по ширині до 80 м та висоті до 50 м в залежності від технічної можливості проведення сорбції. Таким чином, використання моделі доцільне коли сорбція проводиться на початковій стадії аварії або поблизу зони викиду газоподібних НХР, що є важчими відносно повітря. Це відповідає дійсності так як саме поряд із джерелом викиду підрозділи ОРС ЦЗ проводять роботи по рятуванню постраждалих та локалізації викиду газоподібних НХР, що є важчими відносно повітря.

Таким чином, запропонований алгоритм прогнозування інтенсивності сорбції водними струменями важких небезпечних газів, що викидаються в атмосферу внаслідок аварії, базується на послідовності трьох рівнів:

- моніторинг зони аварії,
- прогнозування наслідків аварії,
- прийняття управлінського рішення.

Рівень *моніторингу зони аварії* (викиду важкого небезпечного газу) включає збір та обробку даних щодо метеорологічних умов в зоні аварії, характеру пошкодження технологічного обладнання, виду та кількості газоподібних НХР, що є важчими відносно повітря, наявних у розпорядженні сил та засобів всіх служб цивільного захисту для проведення сорбції газоподібних НХР, що є важчими відносно повітря.

Рівень *прогнозування наслідків аварії* включає введення отриманих вхідних параметрів та розрахунок розмірів зони хімічного ураження в залежності від кількості та послідовності етапів розповсюдження та сорбції важких небезпечних газів.

Рівень *прийняття управлінського рішення* включає визначення критерію безпеки, географічного розташування границь зони ураження важкого небезпечного газу та визначення заходів щодо ліквідації аварії та евакуації населення.

Запропонований алгоритм дозволяє інтегрувати математичні моделі динаміки важких небезпечних газів у практичну діяльність, забезпечує прогнозування інтенсивності сорбції та розмірів зони хімічного забруднення у разі аварійного викиду. Алгоритм функціонує на основі трьох ключових блоків – моніторинг зони аварії (збір даних про метеоумови, характер пошкодження, тип газу та наявні сили), прогнозування наслідків (розрахунок розмірів зони ураження) та прийняття управлінського рішення (визначення критерію безпеки, нанесення меж зони та планування ліквідації).

3.2. Перевірка працездатності методу прогнозування зони хімічного забруднення при викиді важких небезпечних газів

3.2.1. Розробка лабораторної установки та методики проведення досліджень процесу сорбції важких небезпечних газів дисперсними рідинними потоками

Лабораторна установка являє собою камеру для дослідження процесу сорбції важких небезпечних газів відноситься до техніки масообміну та вологої очистки забруднених газових середовищ шляхом взаємодії систем газу (пару) з твердим аерозолем та (або) рідинним аерозолем. Вона призначена для дослідження процесу масообміну при різних фізико-хімічних властивостях систем.

Відома зустрічно-поточна 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 [107]. Недоліком цих абсорберів є зустрічно-поточна схема руху газу та рідини в середині корпусу апарату, що приводить до виносу рідинного аерозолю потоком небезпечних газів, порушення рівномірності розподілу рідини по об'єму камери; також існують обмеження по дисперсності рідинного аерозолю.

Близькою до запропонованої лабораторної установки є камера для дослідження процесів масообміну, яка складається з вертикального герметичного корпусу, вентилятору, запірної арматури, форсунок для подачі води, газоаналізаторів та відсіку для горіння [108]. Недоліком такої камери є її вертикальна конструкція, що не дозволяє проводити дослідження процесів сорбції небезпечних газів при їх горизонтальному розповсюдженні, відсутня можливість моделювання різної швидкості повітряного потоку та відсутня можливість виміру горизонтального розповсюдження небезпечних газів.

Найбільш близькою до запропонованої установки та обраною за прототип є установка, яка складається з горизонтального герметичного корпусу, вентилятору, запірної арматури, форсунок для подачі води та газу, газоаналізатору [109]. Недоліком такої установки є те, що її конструкція не дозволяє проводити дослідження процесу сорбції важких небезпечних газів, зокрема відсутня можливість виміру концентрації небезпечних газів на різних висотах та відсутня можливість виміру інтенсивності осадження при горизонтальному розповсюдженні водно-газового потоку.

Створення лабораторної установки фактично являє собою завдання створення камери для дослідження процесу сорбції важких небезпечних газів, яка дозволить моделювати умови контакту водного аерозолу та важких небезпечних газів при різних фізико-хімічних умовах процесу, яка не матиме вищенаведених недоліків, тобто забезпечуватиме можливість виміру концентрації небезпечних газів на різних висотах та можливість виміру інтенсивності осадження при горизонтальному розповсюдженні водно-газового потоку.

Поставлене завдання вирішується за рахунок того, що в циліндричній, горизонтально розміщеній камері для дослідження процесу сорбції важких небезпечних газів розташовано форсунку для вприскування важкого небезпечного газу, форсунки для вприскування води з можливістю регулювання інтенсивності та дисперсності потоку, датчики газосигналізатору з можливістю переміщення у вертикальному напрямку. З одного боку камеру

обладнано вентилятором для руху газового середовища, з протилежного боку камери обладнано патрубком для виводу газового середовища у безпечне місце. Камера додатково обладнана зливними рідинними патрубками та вимірювачем концентрації зі зливним патрубком для безпечного відведення рідини.

На рис. 3.2 представлена схема запропонованої лабораторної установки у вигляді камери для дослідження процесів сорбції важких небезпечних газів. Камера включає корпус камери; опори камери; вхідний отвір з вентилятором, що нагнітає атмосферне повітря; вихідний газо-повітряний отвір; газовий запірний кран; водяні запірні крани; форсунку для впорскування важких газів; форсунки для впорскування води; відвідний рідинний патрубок; датчики газоаналізатору, що спроможні переміщуватися по вертикалі; газоаналізатор з блоком індикації; виміровач концентрації (прилад для виміру концентрації активних важких небезпечних газів, розчинених у воді).

Для візуального контролю процесу абсорбції камера циліндричного корпусу 1 виконана з прозорою стінкою. Корпус камери 1 розміщено на опорах 2. В верхній частині камери розміщені три цільнофакельні рідинні форсунки 8 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 важких небезпечних газів водними аерозолями різної інтенсивності на різних етапах розповсюдження газової хмари. Рідинні форсунки 8 обладнанні рідинними запірними кранами 6 для регулювання інтенсивності потоку води. Для моделювання зміни інтенсивності газового потоку по об'єму камери з вхідного отвору 3 корпусу 1 встановлено повітряний вентилятор. Встановлені в корпусі 1 пересувні датчики 10 газоаналізатору дозволяють вимірювати концентрацію важкого небезпечного газу в перерізі камери. Кількість та місце розміщення газоаналізатору може змінюватись. Дані від датчиків 10 надходять до газоаналізатору 11 з блоком індикації, де інформація обробляється та відображається. З вхідного боку корпусу 1 розміщено форсунку 7 для впорскування небезпечного газу в об'єм камери. Для регулювання

інтенсивності подачі газу крізь форсунку 7 на її вході розміщено газовий запірний кран 5. Вода з розчиненим небезпечним газом з нижньої частини корпусу 1 камери крізь зливні рідинні патрубки 9, обладнані запірними кранами 6, надходить по трубопроводу до вимірювача концентрації, який дозволяє визначати вміст небезпечного газу в водному розчині при його відборі у різних місцях камери 1. Вимірювач концентрації має зливний патрубок для безпечного відведення забрудненої рідини. Через вихідний газопо-вітряний отвір 4 здійснюється відведення газового середовища з можливим вмістом важкого небезпечного газу з камери 1 у безпечне місце.

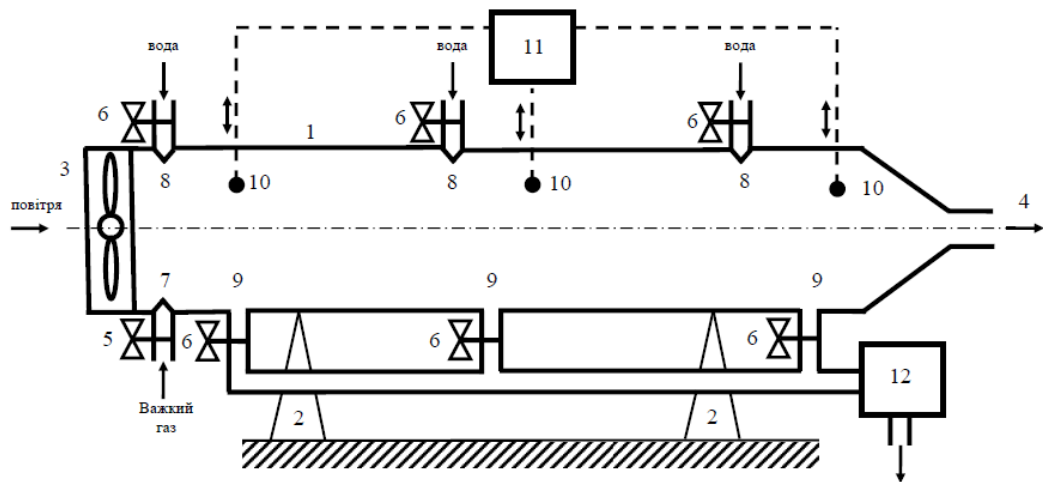


Рис. 3.2. Схема лабораторної установки для дослідження процесів сорбції важких небезпечних газів (1 – корпус камери; 2 – опори камери; 3 – вхідний отвір з вентилятором, що нагнітає; 4 – вихідний газопо-вітряний отвір; 5 – газовий запірний кран; 6 – водяний запірний кран; 7 – форсунка для впорскування небезпечного газу; 8 – форсунка для впорскування води; 9 – зливний рідинний патрубок; 10 – датчик газоаналізатору (спроможний переміщуватися по вертикалі); 11 – газоаналізатор з блоком індикації; 12 – вимірювач концентрації (прилад для виміру концентрації активних важких газів, розчинених у воді); 13 – вихідний патрубок аналізатору)

Лабораторна установка для дослідження процесу сорбції важких небезпечних газів являє собою камеру, яка працює наступним чином. Крізь

форсунку 7 в камеру подається важкий небезпечний газ. Інтенсивність подачі газу регулюється газовим запірним краном 5. Швидкість руху газу вздовж камери регулюється вентилятором, розташованим на вхідному отворі 3. Горизонтальний розподіл концентрації газу вимірюється датчиками 10, розміщеними вздовж камери 1. Дані вимірів датчиків 10 виводяться до газоаналізатору з блоком індикації 11. Датчики 10 мають можливість бути переміщеними по висоті камери 1, що дає можливість вимірювати концентрацію небезпечного газу у повітрі в різних її точках. Зверху вздовж корпусу 1 камери встановлені рідинні форсунки 8 для впорскування в об'єм камери розпорошеної води. За допомогою форсунок 8 можна змінювати дисперсність водного потоку. Інтенсивність водного потоку регулюється запірними кранами 6. Вода з розчиненим газом з нижньої частини корпусу 1 камери крізь зливні рідинні патрубки 9, обладнані запірними кранами 6, надходить по трубопроводу до вимірювача концентрації, який вимірює вміст важкого небезпечного газу в водному розчині при його відборі у різних місцях камери 1. Вимірювач концентрації має зливний патрубок для відведення забрудненої рідини у безпечне місце. Відведення неосадженого газового середовища з вмістом небезпечного газу з камери 1 в безпечне місце, наприклад під витяжну шафу, здійснюється через вихідний газово-повітряний отвір 4. При проході газової хмари крізь водний аерозольний потік відбувається сорбція важкого небезпечного газу. Інтенсивність сорбції визначається порівнянням розподілу концентрації газової хмари в корпусі при різних умовах.

Використання запропонованої лабораторної установки дозволяє підвищити ефективність досліджень процесів сорбції важких небезпечних газів водними аерозолями за рахунок розширення кількості параметрів, що вимірюються, шляхом моделювання різних умов контакту водного аерозолу з важким небезпечним газом при горизонтальному розповсюдженні небезпечної хмари при різних швидкості повітряного потоку, швидкості подачі водного аерозолу в довільному місці на шляху розповсюдження важкого небезпечного газу та можливості виміру просторового розповсюдження концентрації

небезпечного газу та вмісту його в водному розчині при його відборі у різних точках камери установки.

3.2.2. Експериментальна перевірка адекватності математичних моделей осадження важких небезпечних газів дисперсним потоком

Аналітичний розв'язок рівнянь (2.8)–(2.14) не дав позитивного результату по причині необхідності використання багатокаскадного процесу інтегрування. Тому був використаний метод скінчених різниць, який дозволяє отримувати не безперервну площину розподілу значень концентрації важкого небезпечного газу, а розподіл вузлових точок (рис. 2.4). Даний метод дозволяє проводити чисельний розрахунок із використанням математичного пакету MatLab (рис. 3.3). Оператор може сам обирати пріоритет: або точність розрахунку, збільшуючи кількість точок, або оперативність розрахунку, зменшуючи їх у межах виконання умов Куранта-Фрідрікса-Леві.

Розв'язання отриманих рівнянь здійснюється чисельно.

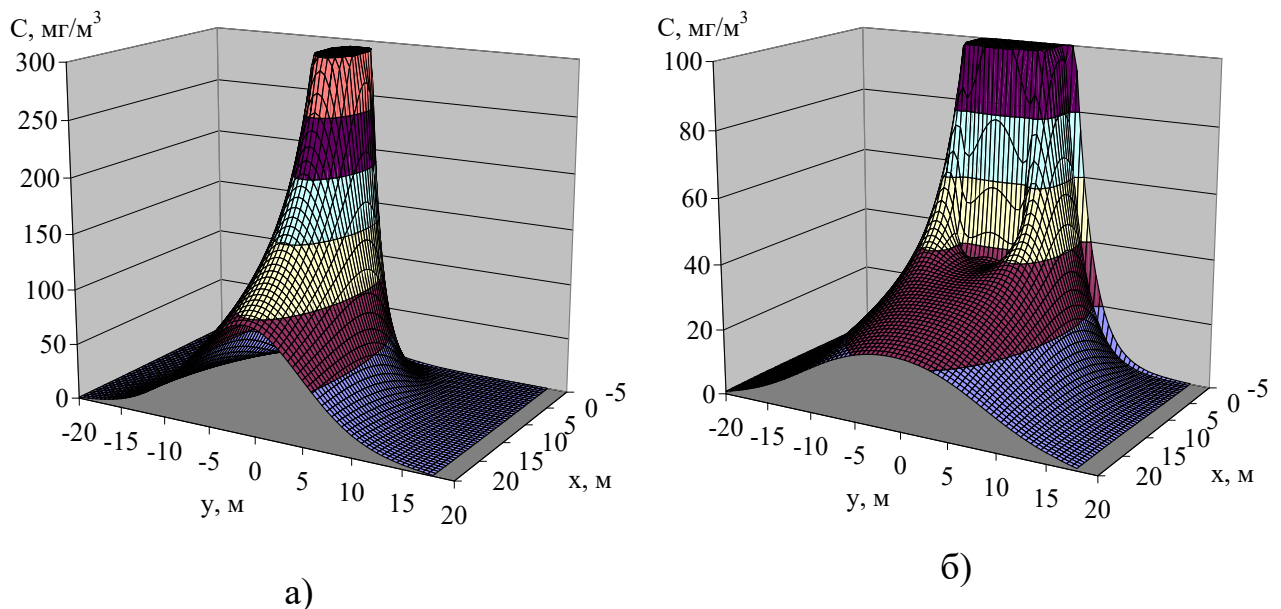


Рис. 3.3. Розподіл концентрації важкого небезпечного газу у просторі на прикладі хлору без осадження (а) та з активним його осадженням дрібнодисперсним потоком чистої води (б)

На рис. 3.3 представлено результати моделювання на прикладі небезпечного важкого газу хлору Cl_2 із активним його осадженням дрібнодисперсним потоком чистої води. Показаний розподіл концентрації важкого газу хлору Cl_2 у просторі із активним його осадженням, що починається на відстані 10 м від точки викиду.

Результати чисельного моделювання (рис. 3.3) продемонстрували працездатність запропонованої моделі. За рахунок низького значення коефіцієнту дифузії хлору Cl_2 у повітрі за нормальних умов швидкість розповсюдження хлору Cl_2 на 65% менша у порівнянні із аміаком NH_3 . Також за рахунок високої густини хлору Cl_2 суттєво падає залежність швидкості розповсюдження небезпечної хмари від швидкості вітру. Для хлору Cl_2 цей показник складає 0,53, тоді як для аміаку NH_3 він досягає 0,95.

Представлені на рис. 3.3 результати демонструють можливість зменшення розміру зони ураження важкого небезпечного газу хлору Cl_2 при його осадженні водою на 38 %, тоді як за тих же умов осадження та викиду розміри хмари аміаку NH_3 знижуються у 2,6 разів.

Слід відмітити, що залежності на рис. 3.3 побудовано за припущення відсутності горизонтальних повітряних потоків, що при суворому розгляді не відповідає дійсності. Однак виходячи з того, що за статистичними даними у більшості випадків співвідношення швидкостей горизонтальних повітряних потоків до вертикальних знаходиться у діапазоні $1:7 \div 1:16$, їх виключення із розрахунку є не критичним. Додатковим фактором для підтвердження цього припущення є спрямованість моделі на розрахунок динаміки розповсюдження саме важкого небезпечного газу.

Для обробки результатів експериментів та побудови математичних моделей використовували математичний метод планування експерименту. Оскільки в усіх експериментах досліджували вплив лише двох чинників (факторів), було поставлено експеримент типу 2^2 . Для побудови полінома

другого порядку використовували метод, запропонований Г. Е. П. Боксом та К. Б. Вільсоном [110].

У роботі застосовували ротатабельні плани другого порядку, оскільки такі плани, на відміну від ортогональних, дають змогу прогнозувати значення функції відгуку з дисперсією, однаковою на рівних відстанях від центру плану [111]. Для цього додатково проводили експерименти в центрі плану (на нульовому рівні) та на відстані d від центру. У цьому випадку зоряне плече d обирали з умови інваріантності плану до обертання.

В умовах проведення двофакторного експерименту для побудови центрального композиційного ротатабельного плану брали 4 зоряні точки та 5 точок на нульовому рівні. Величина плеча d для зоряних точок дорівнює 1,414.

Значення швидкості вітру по осі X змінювалась від 0,5 до 5 м/с. Нижній рівень для інтенсивності дисперсного потоку на осадження складав 0,1 л/м²с, а верхній – 2 л/м²с – інтенсивність що забезпечується штатними пожежними стволами. З урахуванням зіркових точок рівні варіювання факторів мають вигляд табл. 3.1.

Табл. 3.1. Рівні вар'їрування двох факторів

Рівень та інтервал зміни факторів	Швидкість повітряного потоку, м/с	Інтенсивність водяного потоку, л/м ² с
Нульовий рівень, $x_i=0$	2,75	1,05
Інтервал зміни, δ_i	4,5	1,9
Верхній рівень, $x_i=1$	5	2
Нижній рівень, $x_i=-1$	0,5	0,1
Кодове значення	X	X

Матриця двофакторного ротатабельного плану другого порядку представлена в таблиці 3.2.

Табл. 3.2. Умови та результати дослідів з вивчення впливу фізико-хімічних властивостей на вогнегасну здатність рідких систем

Дослід	x ₁	x ₂	ΔС, мг/м ³
Планування типу 2 ²	-1	-1	110
	+1	-1	188
	-1	+1	250
	+1	+1	310
Зіркові точки	-1,414	0	133
	+1,414	0	205
	0	-1,414	226
	0	+1,414	320
Нульові точки	0	0	235
	0	0	243
	0	0	235
	0	0	240
	0	0	234

Розрахунок коефіцієнтів регресії за результатами експериментів проводили за такими формулами:

$$b_0 = \delta_0' \sum_{u=1}^n y_u - \delta_0'' \sum_{u=1}^n \sum_{i=1}^k x_{iu}^2 y_u ; \quad (3.1)$$

$$b_i = \delta_i \sum_{u=1}^n x_{iu} y_u ; \quad (3.2)$$

$$b_{ij} = \delta_{ij} \sum_{u=1}^n x_{iu} x_{ju} y_u ; \quad (3.3)$$

$$b_{ii} = \delta_{ii}' \sum_{u=1}^n x_{iu}^2 y_u + \delta_{ii}'' \sum_{i=1}^k \sum_{u=1}^n x_{iu}^2 y_u - \delta_{ii}''' \sum_{u=1}^n y_u , \quad (3.4)$$

де: i – номер стовпця в матриці планування;

x_{iu} – елементи i -го стовпця;

y_u – результат експерименту при відповідних параметрах.

Значення δ , які входять до формули (3.1)–(3.4): $\delta_0' = 0.2$, $\delta_0'' = 0.1$, $\delta_i = 0.125$, $\delta_{ij} = 0.25$, $\delta_{ii}' = 0.125$, $\delta_{ii}'' = 0.0188$, $\delta_{ii}''' = 0.1$ [112].

Виконавши розрахунок коефіцієнтів регресії, оцінили їх значущість за критерієм Ст'юдента. Довірчий інтервал визначався за формулою:

$$|b_i| \geq \Delta b_i = t_{(0.05; f_y)} \sqrt{\frac{s_y^2}{n}}, \quad (3.5)$$

де: $t_{(0.05; f_y)}$ - 5% - на точка розподілення Ст'юдента з f_y - ступенями свободи, $t=2,7764$ [113];

s_y^2 - дисперсія відтворюваності (похибка дослід), $s_y^2=1,13$.

Отримали рівняння регресії:

$$\Delta C = 1.388 v^2 - 4.733 v + 3.63 I - 0.08 v I + 83.77. \quad (3.6)$$

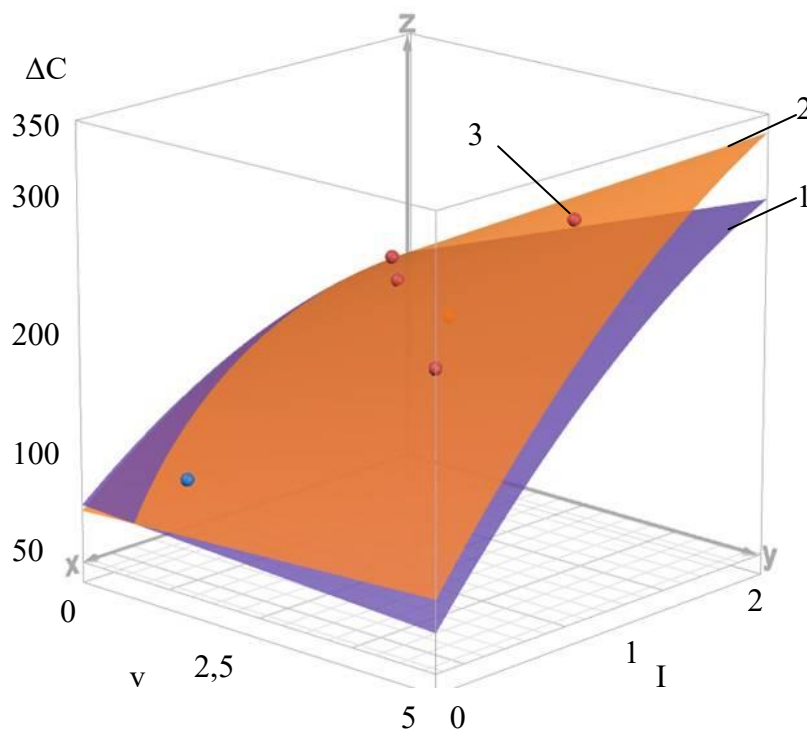


Рис. 3.4. Порівняння теоретичних (площина 1), рівняння регресії (площина 2) та експериментальних даних (площина 3)

Отримавши поліноміальну модель, проводили її статистичну оцінку. Відтворюваність процесу перевіряли за критерієм Кохрена [113] за формулою:

$$G = \frac{s_{u\max}^2}{n} \leq G_{(0.05; f_n; f_u)}, \quad (3.7)$$

$$\sum_{u=1}^m s_u^2$$

де: $s_u^2 = \frac{\sum_{p=1}^m (y_{up} - y_u^-)^2}{m-1}$ – дисперсія, що характеризує розсіювання

результатів дослідження на u -м рівні факторів;

$p=1, 2, \dots, m$ – число паралельних дослідів;

$s_{u\max}^2$ – найбільша з дисперсій в досліді;

$G_{(0.05; f_n; f_u)}$ – табличне значення критерію Кохрена при 5% – м рівні значущості;

$f_n = n$ – число незалежних оцінок дисперсії;

$f_u = m-1$ – число ступенів свободи кожної оцінки.

$$G = 0.652 < G_{(0.05; f_n; f_u)} = 0.807, \quad (3.8)$$

Адекватність моделей перевіряється за критерієм Фішера [113]:

$$F = \frac{s_{ад}^2}{s_0^2} \leq F_{(0.05; f_{ад}; f_y)}, \quad (3.9)$$

де: $s_{ад}^2 = \frac{\sum_{u=1}^m (y_u^- - y_u)^2}{n-k-1}$;

y_u – розрахункове значення відгуку в u -м досліді;

$F_{(0.05; f_{ад}; f_y)}$ – критерій Фішера при 5% – му рівні значущості;

$f_{ад}$ – число ступенів свободи дисперсії адекватності;

f_y – число ступенів свободи дисперсії відтворюваності.

$$F = 2,7862 < F_{(0.05; f_{ад}; f_y)} = 3,9381. \quad (3.10)$$

Таким чином, перевірка адекватності моделі та відтворюваності процесу дала позитивний результат. Результати розраховані з довірчою ймовірністю 0,95 за критерієм Фішера, що засвідчує достовірність розроблених моделей та методу.

3.2.3. Перевірка ефективності методу прогнозування зони хімічного забруднення при викиді важких небезпечних газів

Для перевірки ефективності запропонованого методу порівняємо результати моделювання зони забруднення при викиді 100 тон хлору використовуючи офіційну Методику прогнозування наслідків виливу (викиду) небезпечних хімічних речовин під час аварій на хімічно небезпечних об'єктах і транспорті [42] та метод, запропонований в роботі.

Глибина поширення первинної хмари НХР Γ_1 з урахуванням метеорологічних та топографічних умов, впливу температури повітря на кількість НХР, що переходить у первинну хмару, визначається за формулою:

$$\Gamma_1 = \Gamma_{Т1} \cdot K_{т1} \cdot K_K \cdot K_M, \text{ км}, \quad (3.11)$$

де $\Gamma_{Т1}$ – табличне значення глибини поширення первинної хмари. Наприклад, для резервуару з хлором об'ємом 100 т при швидкості вітру $v = 3 \text{ м/с}$ (легкий бриз) та стану атмосфери інверсія $\Gamma_{Т1} = 14,93 \text{ км}$, конвекція – $\Gamma_{Т1} = 2,36 \text{ км}$, ізотермія – $\Gamma_{Т1} = 5,99 \text{ км}$;

$K_{т1}$ – поправний коефіцієнт, що враховує вплив температури повітря на глибину поширення первинної хмари НХР. Для хлору, що зберігається в резервуарі під тиском, при температурі повітря $(-20)^\circ\text{C}$ – $K_{т1} = 0,5$, при

температурі повітря 0°C – $K_{t1} = 0,8$, при температурі повітря $(+20)^{\circ}\text{C}$ – $K_{t1} = 1,0$;

K_K – коефіцієнт пропорційності, що враховує розбіжності заданої маси НХР з типовими масами НХР. Для резервуару місткістю 100 т незалежно від стійкості повітря $K_K = 1$

K_M – коефіцієнт впливу місцевості. Для рівнинної степової місцевості влітку при стані атмосфери конвекція $K_M = 0,4$, ізотермія та інверсія $K_M = 0,5$.

Таким чином, наприклад, глибина поширення первинної хмари для резервуару з хлором об'ємом 100 т, що розгерметизувався, при швидкості вітру $v = 3 \text{ м/с}$ (легкий бриз), стані атмосфери інверсія, температурі повітря 20°C для рівнинної степової місцевості влітку:

$$\Gamma_1 = \Gamma_{T1} \cdot K_{t1} \cdot K_K \cdot K_M = 14,93 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 0,5 \approx 7,47 \text{ км.} \quad (3.12)$$

Глибина поширення вторинної хмари НХР Γ_2 з урахуванням метеорологічних та топографічних умов, впливу температури повітря на кількість НХР, що переходить у вторинну хмару, визначається за формулою:

$$\Gamma_2 = \Gamma_{T2} \cdot K_{t2} \cdot K_K \cdot K_M, \text{ км,} \quad (3.13)$$

де Γ_{T2} – табличне значення глибини поширення вторинної хмари. Наприклад, для резервуару з хлором об'ємом 100 т при швидкості вітру $v = 3 \text{ м/с}$ (легкий бриз) та стані атмосфери інверсія $\Gamma_{T2} = 39,06 \text{ км}$, конвекція – $\Gamma_{T1} = 5,20 \text{ км}$, ізотермія – $\Gamma_{T1} = 14,28 \text{ км}$;

K_{t2} – поправний коефіцієнт, що враховує вплив температури повітря на глибину поширення первинної хмари НХР. Для хлору, що зберігається в резервуарі під тиском незалежно від температури повітря $K_{t2} = 1,0$.

Глибина поширення вторинної хмари для резервуару з хлором об'ємом 100 т, що розгерметизувався, при швидкості вітру $v = 3$ м/с (легкий бриз), стані атмосфери інверсія, температурі повітря 20°C для рівнинної степової місцевості влітку:

$$\Gamma_2 = \Gamma_{T2} \cdot K_{t2} \cdot K_K \cdot K_M = 39,06 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 0,5 = 19,53 \text{ км}. \quad (3.14)$$

Площа S_1 поширення первинної хмари НХР та площа S_2 (км^2) поширення вторинної хмари НХР визначаються за формулою:

$$S_{1(2)} = \frac{(\Gamma_{1(2)} + R_A)^2 \cdot \varphi_{1(2)}}{60}, \text{ км}^2, \quad (3.15)$$

де R_A – радіус району аварії (км). Наприклад, для хлору, що зберігається в технологічній ємності об'ємом 100 т, $R_A = 0,5$ км;

φ – половина кута сектора (град), у межах якого можливе поширення хмари НХР із заданою довірчою імовірністю P_Γ . У разі довгострокового прогнозування рекомендується приймати довірчу ймовірність $P_\Gamma = 0,9$. Кут сектору первинної хмари при часі від 2 до 6 год випаровування хлору при стані атмосфери інверсія дорівнює $\varphi_1 = 20^{\circ}$, конвекція – $\varphi_1 = 30^{\circ}$, ізотермія – $\varphi_1 = 25^{\circ}$. Кут сектору вторинної хмари при часі від 2 до 6 год випаровування хлору при стані атмосфери інверсія дорівнює $\varphi_2 = 30^{\circ}$, конвекція – $\varphi_2 = 50^{\circ}$, ізотермія – $\varphi_2 = 40^{\circ}$.

Площа поширення первинної хмари хлору, що зберігався у резервуарі об'ємом 100 т та розгерметизувався, у разі довгострокового прогнозування при стані атмосфери інверсія та при часі від 2 до 6 год випаровування хлору:

$$S_1 = \frac{(\Gamma_1 + R_A)^2 \cdot \varphi_1}{60} = \frac{(7,48 + 0,5)^2 \cdot 10}{60} = 10,6 \text{ км}^2. \quad (3.16)$$

Площа поширення вторинної хмари хлору, що зберігався у резервуарі об'ємом 100 т та розгерметизувався, у разі довгострокового прогнозування при стані атмосфери інверсія та при часі від 2 до 6 год випаровування хлору:

$$S_2 = \frac{(\Gamma_2 + R_A)^2 \cdot \varphi_2}{60} = \frac{(19,53 + 0,5)^2 \cdot 15}{60} = 100,3 \text{ км}^2. \quad (3.17)$$

Площа $S_{\text{ПЗХЗ}}$ прогнозованої зони хімічного забруднення визначається залежно відзначень радіусу аварії R_A , глибин поширення Γ_1 та Γ_2 первинної та вторинної хмар та відповідних кутів сектору поширення цих хмар φ_1 та φ_2 . Для прикладу, що досліджується, маємо

$$(\Gamma_1 \approx 7,47 \text{ км}) < (\Gamma_2 = 19,53 \text{ км}) \text{ та } (\varphi_1 = 20^\circ) < (\varphi_2 = 30^\circ). \quad (3.18)$$

Тоді:

$$\begin{aligned} S_{\text{ПЗХЗ}} &= \pi \cdot \left(R_A^2 + \frac{(\Gamma_2^2 - R_A^2) \cdot \varphi_2}{180} \right) = \\ &= \pi \cdot \left(0,5^2 + \frac{(19,53^2 - 0,5^2) \cdot 30}{180} \right) = 200,3 \text{ км}^2. \end{aligned} \quad (3.19)$$

Прогнозована кількість V уражених осіб серед виробничого персоналу об'єкта, де сталася аварія, та населення, яке мешкає поблизу цього об'єкта, визначається за формулами:

$$V = L \cdot (1 - K_3) \text{ або } V = \Delta \cdot S_{06} \cdot (1 - K_3), \text{ осіб}, \quad (3.20)$$

де L – кількість виробничого персоналу (населення) в осередку ураження (осіб);

K_3 – коефіцієнт захищеності виробничого персоналу (населення) від вражаючої дії НХР.

Δ – середня щільність розміщення виробничого персоналу (населення) на території об'єкта (населеного пункту) (осіб/км²);

$S_{об}$ – площа території об'єкта (населеного пункту), що зазнала ураження (км²).

Якщо припустити, що на об'єкті кількість виробничого персоналу в осередку ураження хлором складає $L = 50$ осіб та усі вони знаходяться у виробничих приміщеннях з кратністю повітрообміну 1,0 та часу перебування в зоні хімічного забруднення 1 година, то $K_3 = 0,3$ та кількість уражених складає:

$$B = L \cdot (1 - K_3) = 50 \cdot (1 - 0,3) = 35 \text{ осіб} . \quad (3.21)$$

Тривалість хімічного забруднення характеризується тривалістю уражальної дії НХР та залежить від часу її випаровування з площі виливу та визначення часу підходу хмари НХР до об'єкта.

Час випаровування НХР з площі виливу розраховується за формулою:

$$\tau_{\text{вип}} = \tau_{\text{вип.таб.}} \cdot K_U, \quad (3.22)$$

де $\tau_{\text{вип.таб.}}$ – час випаровування НХР за швидкості повітря $v = 1 \text{ м/с}$. Час випаровування 100 т хлору за швидкості повітря $v = 1 \text{ м/с}$ при температурі $+20^\circ\text{C}$ дорівнює $\tau_{\text{вип.таб.}} = 7,4$ години ;

K_U – коефіцієнт, що враховує вплив швидкості вітру на час випаровування НХР. При швидкості повітря $v = 3 \text{ м/с}$ коефіцієнт $K_U = 0,55$.

Тоді:

$$\tau_{\text{вип}} = \tau_{\text{вип.таб.}} \cdot K_U = 7,4 \cdot 0,55 \approx 4,1 \text{ години.} \quad (3.23)$$

Час $t_{1(2)}$ підходу хмари НХР до об'єкта, що знаходиться в межах зон розповсюдження первинної та/або вторинної хмар НХР, залежить від швидкості перенесення хмари повітряними потоками та визначається за формулою:

$$t_{1(2)} = \frac{\Gamma_{1(2)}}{v}, \text{ год.} \quad (3.24)$$

При $\Gamma_1 \approx 7,47 \text{ км}$, $\Gamma_2 = 19,53 \text{ км}$ та $v = 3 \text{ м/с}$ отримуємо:

$$t_1 = \frac{\Gamma_1}{v} = \frac{7,47 \cdot 1000}{3 \cdot 3600} = 0,7 \text{ год.} \quad (3.25)$$

$$t_2 = \frac{\Gamma_2}{v} = \frac{19,53 \cdot 1000}{3 \cdot 3600} = 1,8 \text{ год.} \quad (3.26)$$

На рис. 3.5. наведено прогнозовані зони ураження від викиду 100 тон хлору при розрахунках за офіційною методикою [42] (зона 1) та методом, розробленим в роботі (зона 2).

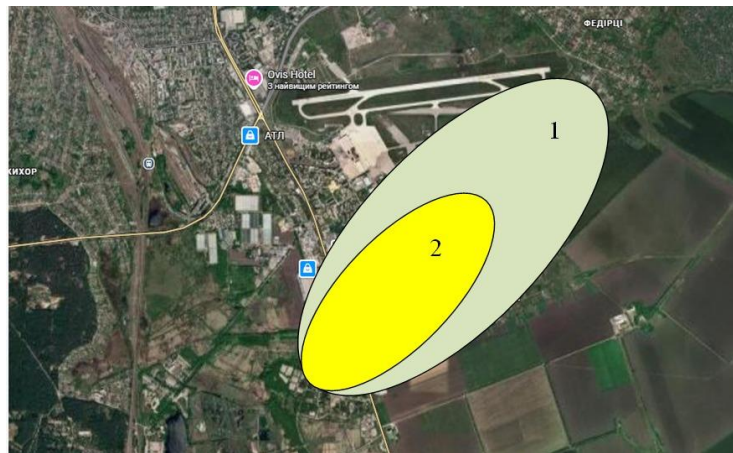


Рис. 3.5. Розміри прогнозованої зони ураження від вторинної хмари Γ_2 при розрахунках за офіційною методикою [42] (зона 1) та методом, розробленим в роботі (зона 2)

Як видно з рисунку запропонований метод дозволяє суттєво уточнити зону ураження у бік скорочення, що з урахуванням рівнянь 3.20-3.26 суттєво впливає як на кількість потенційно уражених осіб, так і на організацію заходів захисту персоналу та населення.

3.3. Програмна реалізація методу нейтралізації важких небезпечних газів дрібнодисперсним рідинним потоком

З метою забезпечення практичного використання розробленого алгоритму прогнозування інтенсивності сорбції водяними струменями важких небезпечних газів, що викидаються в атмосферу внаслідок аварії, розроблено програмний комплекс «Прогноз важких небезпечних газів», інтерфейс якого наведений на рис. 3.6.

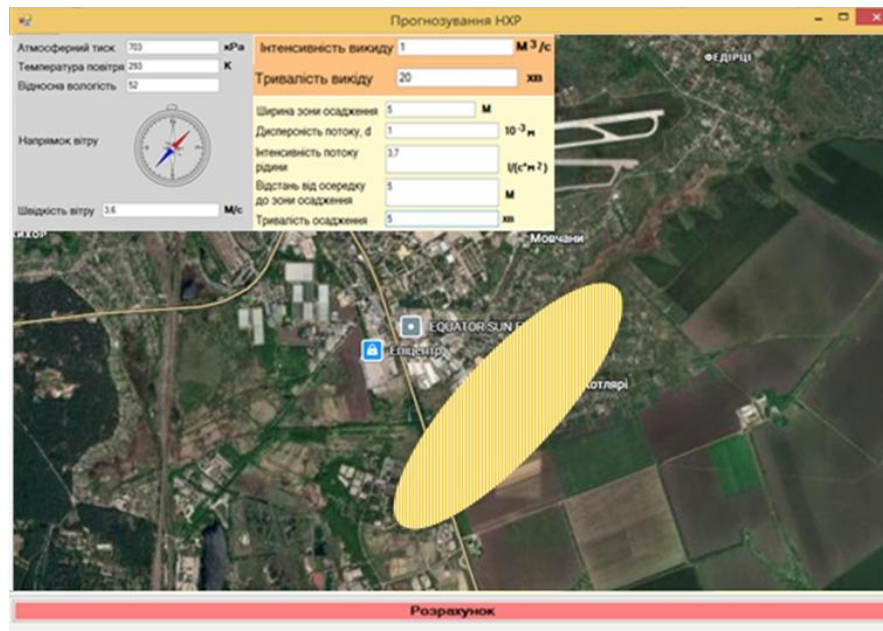


Рис. 3.6. Інтерфейс програмного комплексу «Прогноз важких небезпечних газів»

Інтерфейс програмного комплексу «Прогноз важких небезпечних газів» умовно розділений на декілька робочих областей. Найбільшу частину займає інтерактивна карта місцевості, інтегрована із сервісом Google Maps. Це

дозволяє оперативно шукати координати епіцентру викиду важкого небезпечного газу або навпаки за відомими координатами відобразити епіцентр на карті. Координати епіцентру викиду важких небезпечних газів заносяться в окрему область у правій верхній частині інтерфейсу.

Окремим блоком інтерфейсу є блок «Атмосфера», в який вносяться найбільш значущі метеорологічні параметри атмосфери: температура, тиск, швидкість та напрямок вітру. Ці параметри легко можна отримати із портативної метеостанції або від Гідрометеоцентру.

В окремий блок виведені параметри важкого небезпечного газу. З бібліотеки найбільш розповсюджених важких небезпечних газів оператор обирає необхідну й заносить інтенсивність її викиду з технологічного апарату.

Останній блок інтерфейсу призначений для введення параметрів сорбції важкого небезпечного газу, а саме:

- ширини зони сорбції,
- інтенсивності та дисперсності сорбенту (водяного потоку),
- відстані від осередку викиду до початку зони сорбції.

Структуру програми можна описати за принципом Модульного Дизайну та архітектури Модель-Вид-Контролер (Model-View-Controller (MVC) [114]), де кожен блок інтерфейсу відповідає певному набору даних і логіки.

1. Основні Модулі та компоненти

Програму можна розділити на такі ключові модулі:

Модуль інтерфейсу користувача (UI/View): Відповідає за відображення та взаємодію з користувачем (табл. 3.3).

Модуль обробки даних (Data/Model): Містить дані, бібліотеки та логіку розрахунків.

Модуль управління (Controller): Обробляє введення користувача, координує дані та оновлює вигляд.

Модуль інтеграції з картами (Map Integration): Спеціалізований модуль для роботи з Google Maps API.

Табл. 3.3. Модуль Інтерфейсу Користувача (UI Components)

Компонент UI	Розташування	Призначення
Інтерактивна Карта (Map_View)	Найбільша частина	Відображення місцевості, пошук та відображення епіцентру. Інтеграція з Google Maps.
Панель Координат (Coordinates_Input)	Права верхня частина	Введення/відображення координат епіцентру викиду (широта, довгота).
Блок "Атмосфера" (Atmosphere_Input)	Окремий блок	Введення метеорологічних параметрів: температура, тиск, швидкість/напрямок вітру.
Блок "Небезпечний Газ" (Gas_Input)	Окремий блок	Вибір газу з бібліотеки, введення інтенсивності викиду.
Блок "Сорбція" (Sorption_Input)	Окремий блок	Введення параметрів сорбції: ширина зони, інтенсивність/дисперсність сорбенту, відстань до початку зони сорбції.
Панель Результатів (Results_Display)	(Припускається)	Відображення зони поширення газу, візуалізація сорбційної зони, результати розрахунків.

Модуль обробки даних та логіки (Model/Data Logic) містить бізнес-логіку та дані, необхідні для прогнозу:

Клас/Структура Даних (Data_Model):

Epicenter_Data: Зберігає координати.

Atmosphere_Data: Зберігає метеопараметри.

Gas_Data: Зберігає обраний газ, його фізико-хімічні властивості (з бібліотеки) та інтенсивність викиду.

Sorption_Data: Зберігає параметри сорбції.

Бібліотека Газів (Gas_Library):

Сховище для параметрів найбільш розповсюджених важких небезпечних газів (наприклад, густина, токсичність, гранично допустимі концентрації тощо).

Модуль Прогнозування (Prediction_Engine):

Алгоритми для розрахунку поширення важкого газу з урахуванням атмосферних умов, інтенсивності викиду та рельєфу (який отримується з карти).

Модуль Розрахунку Сорбції (Sorption_Calculator):

Логіка для оцінки ефективності та впливу параметрів сорбції на зону забруднення.

2. Взаємодія Компонентів (Controller Flow)

- Контролер координує роботу між UI та Логікою.
- Введення Даних: Користувач взаємодіє з UI Components (вводить координати, параметри атмосфери, газу та сорбції).
- Збереження: Controller приймає введені дані та оновлює Data Model.
- Запит Розрахунку: Після введення всіх необхідних параметрів, Controller викликає:
 - Prediction Engine (для розрахунку зони поширення).
 - Sorption Calculator (для коригування прогнозу з урахуванням сорбції).
- Відображення Результату: Prediction Engine повертає координати зони забруднення. Controller передає їх до:
 - Map Integration Module для візуалізації зони поширення та сорбції на Інтерактивній Карті.
 - Results Display для виведення текстових/числових результатів.

3. Приклад Структури Файлів (Pseudo-Code / Folders)

```
/HeavyGasPredictor
|-- /src
|   |-- /ui           # файли інтерфейсу (View)
|   |   |-- Map_View.py
|   |   |-- Coordinates_Input.py
|   |   |-- Atmosphere_Input.py
|   |   |-- Gas_Input.py
|   |   |-- Sorption_Input.py
|   |   |-- Results_Display.py
```

```

| | |-- main_window.py
| |
| | |-- /models # Структури даних (Model)
| | |-- Data_Model.py
| | |-- Gas_Library.json # Або база даних
| |
| | |-- /logic # Логіка розрахунків
| | |-- Prediction_Engine.py
| | |-- Sorption_Calculator.py
| |
| | |-- /controllers # Обробники подій (Controller)
| | |-- Main_Controller.py
| | |-- Map_Controller.py
| |
| | |-- /utils # Допоміжні функції
| | |-- Map_Integration_API.py # Обгортка для Google Maps API
| |
| | |-- main.py # Точка входу

```

Таким чином, на основі запропонованого алгоритму розроблено програмну реалізацію запропонованого методу у вигляді комп'ютерної програми «Прогноз важких небезпечних газів», яка дозволяє здійснювати прогнозування наслідків аварій із викидом важких небезпечних газів з наявністю або відсутністю їх сорбції. Програма «Прогноз важких небезпечних газів» складається з блоків «Атмосфера», «Викид», «Осадження» для введення вхідних параметрів на інтерактивну карту місцевості для виведення на ній результатів прогнозування.

Висновки до розділу 3.

1. Запропоновано алгоритм, який дозволяє інтегрувати математичні моделі динаміки важких небезпечних газів у практичну діяльність, забезпечує прогнозування інтенсивності сорбції та розмірів зони хімічного забруднення у разі аварійного викиду. Алгоритм функціонує на основі трьох ключових блоків: моніторинг зони аварії (збір даних про метеоумови, характер пошкодження, тип газу та наявні сили), прогнозування наслідків (розрахунок розмірів зони ураження) та прийняття управлінського рішення (визначення критерію безпеки, нанесення меж зони та планування ліквідації).

2. Розроблено лабораторну установку у вигляді камери для дослідження процесу сорбції важких небезпечних газів яка включає датчики

газоаналізатору, що спроможні переміщуватися по вертикалі та газоаналізатор з блоком індикації. Проведено експериментальну перевірку адекватності розробленої моделі осадження та нейтралізації важких небезпечних газів дисперсним потоком рідини. Перевірка адекватності моделі та відтворюваності процесу дала позитивний результат. Результати розраховані з довірчою ймовірністю 0,95 за критерієм Фішера, що засвідчує достовірність розроблених моделей та методу. Ефективність запропонованого методу підтверджена розрахунковим шляхом у порівнянні із затвердженою методикою розрахунку. Встановлено, що внаслідок низького значення коефіцієнту дифузії хлору у повітрі за нормальних умов швидкість розповсюдження хлору на 65 % менша у порівнянні із аміаком. Також внаслідок високої густини хлору суттєво падає залежність швидкості розповсюдження небезпечної хмари від швидкості вітру. Для хлору цей показник складає 0,53, для аміаку – 0,95. Таким чином, вплив швидкості вітру на осадження хлору є набагато меншим у порівнянні з аміаком, що збільшує вагомість внеску процесу дифузії. Зменшення розміру зони ураження хлору при його осадженні водою відбувається у 1,61 рази, тоді як за аналогічних умов викиду та осадження аміаку розміри хмари зменшуються у 2,6 разів.

3. Практичну реалізацію запропонованого алгоритму здійснено у вигляді комп'ютерної програми «Прогноз важких небезпечних газів». Інструментарій програми забезпечує прогнозування зони хімічного забруднення при викиді важких газів з можливістю варіювання параметрів їх сорбції. Програма «Прогноз важких небезпечних газів» складається з блоків «Атмосфера», «Викид», «Осадження» для введення вхідних параметрів на інтерактивну карту місцевості для виведення на ній результатів прогнозування.

РОЗДІЛ 4.

ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО ПРАКТИЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ МЕТОДУ ПРОГНОЗУВАННЯ ЗОНИ ХІМІЧНОГО ЗАБРУДНЕННЯ ПРИ ВИКИДІ ВАЖКИХ НЕБЕЗПЕЧНИХ ГАЗІВ

В розділі проведено розрахунок економічної ефективності запропонованого методу прогнозування зони хімічного забруднення при викиді важких небезпечних газів. Розроблено практичні рекомендації керівнику ліквідації НС з викидом важких небезпечних газів. Окремо запропоновано рекомендації щодо переоблаштування стаціонарних систем осадження важких небезпечних газів на стаціонарних об'єктах зберігання таких газів. Окрему увагу відведено особливостям ліквідації НС з викидом важких газів під час воєнного стану. Обґрунтовано, що успіх ліквідації безпосередньо залежить від забезпечення герметизації та захисту укриттів як для цивільного населення, так і для рятувальників, швидкого використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для розвідки, а також від бездоганної координації сил ДСНС, військових та поліції.

Основні результати розділу викладені в публікації [22].

4.1. Розрахунок економічної ефективності запропонованого методу прогнозування зони хімічного забруднення при викиді важких небезпечних газів

Проведемо оцінку економічної ефективності запропонованого методу прогнозування зони хімічного забруднення при викиді важких небезпечних газів [115] на прикладі витоку на ґрунт 20 т хлору.

Спочатку проведемо розрахунок матеріальних витрат для ліквідації НС без застосування запропонованого в роботі методу (1 у.о. = 1 USD):

1. Засоби Індивідуального Захисту.

Роботи виконуються бригадами в ізолюючих костюмах та з використанням засобів примусової подачі повітря, що має високу вартість.

Табл. 4.1. Витрати на ЗІЗ [116]

Матеріал	Кількість (оцінка)	Ціна за одиницю	Сума витрат, у.о.
Хімічно стійкі ізолюючі костюми (багаторазові)	10 шт.	1000-3000 у.о./шт	20 000
Фільтри/коробки для протигазів	30 шт.	50-100 у.о./шт	2 250
Освітлювальні прилади, зв'язок (іскробезпечні)	Комплект		3 000
РАЗОМ: ЗІЗ та обладнання			25 250

2. Роботи з вилучення та утилізації забрудненого ґрунту

При розливі 20 тонн хлору на ґрунт, утворюється значна пляма забруднення. Припустимо, що глибина забруднення становить 0,5 м, а площа – 100 м².

Обсяг забрудненого ґрунту: $100 \text{ м}^2 \times 0,5 \text{ м} = 50 \text{ м}^3$.

Вага ґрунту: $50 \text{ м}^3 \times 1,6 \text{ т/м}^3 = 80 \text{ т}$.

Табл. 4.2. Витрати на вилучення та утилізацію забрудненого ґрунту [117]

Послуга/Матеріал	Кількість (оцінка)	Ціна за одиницю	Сума витрат, у.о.
Виймка забрудненого ґрунту	50 м ³	30-50 у.о./м ³	2 000
Транспортування забрудненого ґрунту (як небезпечного відходу)	80 т	50-80 у.о./т	5 200
Утилізація ґрунту (спецполігони/знешкодження)	80 т	150-350 у.о./т	20 000
Засипка чистим ґрунтом/піском	50 м ³	25-40 у.о./м ³	1 500
РАЗОМ: Ґрунт та утилізація			28 700

3. Витрати на оплату праці

Ліквідація аварій із НХР вимагає залучення сертифікованих фахівців HAZMAT (HAZardous MATerials) [118], чия погодинна ставка значно вища за

звичайну. Враховується інтенсивна робота протягом перших 5 днів (включаючи час на дорогу та підготовку), при цьому ставки включають накладні витрати, страхування та ризикові надбавки.

Табл. 4.3. Витрати на оплату праці

Категорія	Оцінка погодинної ставки, у.о./год	Загальна кількість годин (для 5 днів роботи), год	Сума витрат, у.о.
Команда HAZMAT техніків (4 особи)	150-300 (в середньому 200)	40год/день×5днів=200	40 000
Керівники/супервайзери (1-2 особи)	250-400	15год/день×5днів=75	15 000
Оператори спецтехніки (Екскаватор, Помпи, 2 особи)	80-150	20год/день×5днів=100	10 000
Лаборанти/фахівці з Моніторингу (2 особи)	100-180	20год/день×5днів=100	12 000
РАЗОМ: Оплата праці			77 000

4. Робота спеціалізованої техніки

Для такого масштабного витоку та необхідності виїмки ґрунту потрібна важка та спеціалізована техніка [119].

Табл. 4.4. Витрати на залучення спеціальної техніки

Обладнання	Призначення	Оцінка терміну оренди	Орієнт. вартість оренди, у.о.
Екскаватор-навантажувач (для виїмки 80 т ґрунту)	Виїмка забрудненого ґрунту.	5 днів	2 500-4 000
Вантажівки/самоскиди (для транспортування ґрунту)	Перевезення 80 т небезпечного ґрунту до місця утилізації.	2 дні	2 000-3 000
Повітряні скрубери/дегазатори (великої потужності)	Очищення повітря від залишкового хлору та контроль запаху.	5 днів	4 500-6 000
Обладнання для моніторингу повітря	Постійний контроль концентрації хлору	5 днів	2 000-3 000
РАЗОМ:			11 000-16 000

Табл. 4.5. Загальні витрати на ліквідацію НС без осадження хмари хлору

№	Категорія витрат	Орієнтовна сума, у.о.	Коментар
1	ЗІЗ	25 250	Ізолюючі костюми, фільтри, обладнання зв'язку.
2	Вилучення та утилізація ґрунту	28 700	Виймка, транспортування та утилізація 80 тонн забрудненого ґрунту.
3	Оплата праці фахівців HAZMAT	77 000	Робота команди фахівців протягом 5 днів.
4	Залучення спеціалізованої техніки	14 000	Цистерни, насоси, скрубери, земляні роботи (середнє значення).
	Загальні орієнтовні витрати	144 950	Сума матеріальних, трудових та технічних витрат.

Для розрахунку витрат на ліквідацію аварії із витоком 20 тон хлору із проведення активного осадження та використанням нейтралізуючих речовин, як запропоновано в методиці, прийmemo до уваги висновок з розділу 2 де визначено, що використання активного осадження дозволяє скоротити зону ураження на 65%. Відповідно до цього пропорційно скорочується об'єм залучення сил та засобів на проведення всіх робіт. Однак виникають додаткові витрати на проведення осадження (табл. 4.6 – 4.8).

1. Реагенти для нейтралізації хлору

Хлор утворює з водою соляну (HCl) та хлорноватисту (HClO) кислоти, які необхідно нейтралізувати лугом (наприклад, вапняним молоком $\text{Ca}(\text{OH})_2$ або кальцинованою содою Na_2CO_3).

Хімічні вимоги: Теоретично, для нейтралізації 1 т Cl_2 потрібно приблизно 0,8-1,0 т 20% розчину $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Загальна потреба для 20 т Cl_2 : $20 \text{ т} \times 1,0 \text{ т} = 20 \text{ т}$ 20% $\text{Ca}(\text{OH})_2$ розчину.

Табл. 4.6. Витрати на нейтралізацію хлору [120]

Матеріал	Кількість (оцінка)	Ціна за одиницю	Сума витрат, у.о.
Вапно негашене (для приготування 20% Ca(OH) ₂)	5 т сухої речовини	150-200 у.о./т	1 000
Технічна вода (для розчинів та осадження)	30 м ³	5-10 у.о./м ³	300
Розчинники/піноутворювачі (для локалізації)	500 л	2-5 у.о./л	2 000
РАЗОМ: Нейтралізація			3 300

2. Збір, зберігання та утилізація рідин

Нейтралізований хлорний розчин та промивні води є небезпечними відходами.

Табл. 4.7. Витрати на зберігання та утилізація рідин

Послуга/Матеріал	Кількість (Оцінка)	Ціна за одиницю (Орієнт. USD)	Сума витрат (USD)
Контейнери/Бочки (для збору розчинів)	15 шт.	100-200 у.о./шт	2 250
Утилізація рідких відходів (після нейтралізації, 30 т)	30 т	150-300 у.о./т	6 750
РАЗОМ:			8 950

Табл. 4.8. Витрати на залучення додаткової спеціальної техніки для проведення осадження [119]

Обладнання	Призначення	Оцінка терміну оренди	Орієнт. вартість оренди, у.о.
Автомобілі цистерни/поливомийні машини (для розчинів)	Доставка та розпилення нейтралізуючих розчинів.	5 днів	5 000
Високопродуктивні насоси та рукава	Перекачування нейтралізуючих розчинів та забруднених стоків.	5 днів	1 500
РАЗОМ:			6 500

Загальні витрати на ліквідацію НС із використанням запропонованого методу наведено у таблиці 4.9.

Табл. 4.9. Загальні витрати на ліквідацію НС з осадженням хмари хлору

№	Категорія витрат	Орієнтовна вартість, у.о.	Коментар
1	Реагенти для нейтралізації	3 300	Вапно, вода, розчинники.
2	ЗІЗ	25 250×0,6	Ізолюючі костюми, фільтри, обладнання зв'язку.
3	Вилучення та утилізація ґрунту	28 700×0,65	Виймка, транспортування та утилізація ≈ 80 тонн забрудненого ґрунту.
4	Збір та утилізація рідин/відходів	6 500	Контейнери та утилізація рідких та твердих відходів.
5	Оплата праці фахівців НАЗМАТ	77 000×0,65	Робота команди фахівців протягом 5 днів.
6	Залучення спеціалізованої техніки	14 000×0,65	Скрубери, земляні роботи (середнє значення).
7	Додаткове залучення спеціалізованої техніки	6 500	Цистерни, насоси.
	Загальні орієнтовні витрати	104 080	Сума матеріальних, трудових та технічних витрат.

Таким чином, економічний ефект при використанні запропонованого методу осадження хлору дрібнодисперсним потоком рідини з нейтралізуючими речовинами на прикладі викиду 20 тон хлору може досягати 40870 у.о. (1757,410 тис. грн. за курсом на 23.01.2026) без врахування екологічних збитків, врахування яких додатково збільшить цей показник.

4.2. Практичні рекомендації керівнику ліквідації надзвичайних ситуацій з викидом важких небезпечних газів

Керівник ліквідації НС при викиді важких небезпечних газів (таких як хлор, сірководень, пропан/бутан та інші, густина яких значно перевищує

густину повітря) повинен діяти швидко, рішуче та відповідно до чіткого алгоритму, враховуючи особливості поширення цих речовин.

Негайна оцінка та ізоляція. Першочергово необхідно максимально швидко ідентифікувати тип газу, оцінити його концентрацію та джерело витоку. Слід негайно встановити зону небезпеки та зону можливого зараження, використовуючи дані про напрямок та швидкість вітру, а також відому здатність важких газів стелитися по землі та заповнювати низини, підвали, тунелі. Необхідно терміново ізолювати зону (встановити периметр безпеки) та перекрити рух транспорту і пішоходів.

Захист персоналу та населення. Усі учасники ліквідації (рятувальники, медики) НС повинні бути забезпечені відповідними ЗІЗ органів дихання та шкіри. Для важких газів часто потрібні ізолюючі дихальні апарати. Головне – оповіщення населення. Слід дати чіткі інструкції:

- для важких газів евакуація проводиться у напрямку перпендикулярному до напрямку вітру та/або на височину;

- якщо евакуація неможлива, необхідно провести герметизацію приміщень (режим укриття) вище першого поверху, оскільки важкий газ буде накопичуватися внизу.

Локалізація та ліквідація. Насамперед, необхідно вжити заходів для припинення витоку (якщо це можливо і безпечно). Якщо витік припинити неможливо, слід застосувати методи осадження або розсіювання газу. Для багатьох важких газів (наприклад, хлору) ефективним є використання водяних завіс (тонко розпилена вода), які сприяють поглинанню та осадженню газу. При цьому важливо пам'ятати, що вода повинна подаватися з безпечної відстані. Заборонено спрямовувати струмінь води на джерело витоку, якщо це може погіршити ситуацію (наприклад, роз'їсти пошкодження). Вентиляція приміщень, де зібрався важкий газ, повинна проводитися лише після його розрідження до безпечної концентрації та з урахуванням напрямку вітру, щоб не наражати на небезпеку інші райони.

Координація та моніторинг. Керівник ліквідації НС повинен підтримувати безперервний зв'язок зі штабом, рятувальними підрозділами, медичними службами та службами моніторингу навколишнього середовища. Необхідно забезпечити постійний моніторинг концентрації газу в зоні ліквідації та на межі санітарно-захисної зони. Рішення про допуск персоналу та зняття обмежень для населення приймаються лише на підставі даних хімічної розвідки про досягнення безпечних концентрацій.

Деконтамінація. Після успішної ліквідації витоку обов'язково організовується процес деконтамінації (знезараження) забруднених об'єктів, обладнання, транспорту та персоналу. Деконтамінація має критичне значення для запобігання поширенню небезпечної речовини за межі зони зараження. Процес деконтамінації завжди організовується на межі зони забруднення (так звана «тепла зона») і включає кілька послідовних етапів:

1. *Попереднє очищення (сухий етап).* На цьому етапі видаляються найбільш великі частки чи залишки НХР (особливо, якщо газ утворив вторинне забруднення, наприклад, рідкі або тверді відкладення). Це може включати обтрушування, очищення щітками чи використання адсорбентів.

2. *Основне миття (мокрый етап).* Проводиться обробка забрудненого обладнання та ЗІЗ нейтралізуючими або дезактивуючими розчинами, які специфічні для викинутого газу (наприклад, лужні розчини для кислотних газів, або розчини хлораміну/гіпохлориту для деяких інших). Миття проводиться під низьким тиском, щоб уникнути розбризкування.

3. *Обполіскування.* Ретельне змивання нейтралізуючих розчинів та залишків хімічної речовини чистою водою.

4. *Зняття ЗІЗ та медичний контроль.* Персонал у безпечному місці знімає захисний одяг та обладнання, яке потім також проходить деконтамінацію чи утилізацію. Обов'язковим є медичний огляд персоналу для виявлення ознак впливу токсичної речовини. Усі стічні води та відходи деконтамінації повинні бути зібрані та утилізовані відповідно до екологічних норм, щоб запобігти вторинному забрудненню ґрунту та водних ресурсів.

Важливо провести аналіз події для вдосконалення планів реагування у майбутньому.

Післядія. Слід провести медичне обстеження постраждалого населення та рятувальників. Важливо провести аналіз події для вдосконалення планів реагування у майбутньому.

Таким чином, розроблено практичні рекомендації використання запропонованого методу прогнозування розвитку НС з викидом важких газів із додатковим описом повної процедури організації робіт при таких аваріях, які включають розвідку місця аварії, розгортання сил та засобів, осадження небезпечної хмари, утилізацію забрудненої рідини та проведення деконтамінації.

4.3. Рекомендації щодо переоблаштування стаціонарних систем осадження важких небезпечних газів

Переоблаштування стаціонарних систем осадження важких небезпечних газів, зокрема хлору (Cl_2), на складах та інших промислових об'єктах є критично важливим для забезпечення екологічної та промислової безпеки. Головна мета модернізації – підвищення оперативної ефективності, швидкості реагування на аварійні викиди та загальної надійності всієї системи нейтралізації. Основний метод, який підлягає вдосконаленню, – це нейтралізація хлору шляхом його осадження водними розчинами лужних реагентів безпосередньо у зоні викиду.

1. Оптимізація вибору та приготування нейтралізуючого реагенту

Для ефективної нейтралізації хлору, який є важким газом і має властивість накопичуватися у нижніх шарах приміщення, необхідно використовувати сильні лужні розчини. Хоча як варіанти можуть розглядатися сода кальцинована (Na_2CO_3) або вапняне молоко ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), оптимальним реагентом є 5-10% водний розчин гідроксиду натрію (їдкий натр, NaOH). Він забезпечує найбільш високу швидкість хімічної взаємодії з хлором, що є

вирішальним фактором під час аварії. Хімічна реакція протікає за схемою: $\text{Cl}_2 + 2\text{NaOH} \rightarrow \text{NaCl} + \text{NaClO} + \text{H}_2\text{O}$. Для забезпечення безперебійної та швидкої реакції необхідно, щоб концентрація лугу була достатньо високою, а його об'єм значно перевищував стехіометрично необхідну кількість.

Для зберігання реагенту слід передбачити спеціалізовані, хімічно стійкі та герметичні робочі ємності. Ці ємності повинні бути обладнані автоматичними системами контролю рівня та температури, а також дозуючими насосами для високоточного та швидкого подання розчину. При використанні вапняного молока ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) обов'язковою є наявність мішалок для запобігання седиментації осаду та забезпечення однорідності суспензії. Ключовий розрахунковий параметр – об'єм реагенту. Він має бути розрахований на нейтралізацію максимального теоретично можливого аварійного викиду (наприклад, повного вмісту найбільшого контейнера або балона, що зберігається), з обов'язковим технологічним запасом у розмірі не менше 20-30% для компенсації можливих втрат, нерівномірного розпилення чи зниження фактичної концентрації реагенту.

2. Вдосконалення механізмів подачі, розпилення та збору розчину

Ефективність системи осадження прямо залежить від якості розпилення реагенту, яке повинно забезпечувати максимальну площу контакту рідкої фази з газоподібним хлором. Модернізація вимагає заміни застарілих розбризкувачів на високоефективні двофазні форсунки або форсунки, що генерують дрібнодисперсний туман (до 50-100 мкм). Такий туман швидше "осаджує" важкий газ.

Розміщення форсунок є критичним: їх слід встановити по всьому периметру складу на мінімальній висоті (оптимально 0,3-1,0 м від рівня підлоги), оскільки саме там концентрується важкий хлор, спрямовуючи потік розчину горизонтально або з невеликим нахилом вниз для створення зони реакції безпосередньо над джерелом витоку.

Паралельно необхідно модернізувати систему дренажу та збору відпрацьованого розчину. Дренажні лотки та канали повинні мати достатню

пропускну здатність для швидкого відведення великого обсягу рідини (нейтралізатор + конденсат + продукти реакції). Усі елементи системи (лотки, труби, насоси) мають бути виготовлені з корозійностійких матеріалів (наприклад, поліпропілену або спеціальних марок нержавіючої сталі). Зібраний відпрацьований розчин, який містить хлориди та гіпохлорити, повинен автоматично надходити до спеціального аварійного резервуару-накопичувача для подальшої безпечної утилізації чи переробки, запобігаючи потраплянню токсичних речовин у загальну каналізаційну мережу.

3. Інтеграція автоматизованого контролю та вентиляційної системи

Ключовим елементом підвищення безпеки є автоматизація запуску. Встановлення двох або трьох незалежних рівнів стаціонарних газоаналізаторів для моніторингу концентрації хлору є обов'язковим. Система повинна бути запрограмована на автоматичне спрацьовування системи розпилення вже при досягненні низького порогу концентрації (наприклад, $1-3 \sim \text{мг/м}^3$), що свідчить про початок витоку. Крім того, обов'язково має бути передбачена можливість ручного дублюючого запуску системи з безпечної зони, розташованої поза приміщенням складу.

Вентиляційна система також потребує значної модернізації. Потрібно встановити потужну систему примусової аварійної витяжної вентиляції, яка має забирати повітря виключно з нижньої зони приміщення (на висоті 0,1-0,3 м) для ефективного видалення хлору. Витяжний повітряний потік категорично заборонено викидати безпосередньо в атмосферу. Він має проходити через окремий, високоефективний "мокрый" скруббер (газопромивач) [121]. У цьому скруббері відбувається додаткова, фінальна нейтралізація залишків хлору тим самим лужним розчином, що забезпечує двоступеневе очищення: первинне осадження у приміщенні і вторинне доочищення у скруббері. На виході зі скруббера необхідно встановити контрольний газоаналізатор для постійного моніторингу концентрації хлору, що викидається, гарантуючи його відповідність екологічним нормам.

4. Організаційне забезпечення та аварійне живлення

Для гарантування безперебійної роботи системи в умовах аварії критично важливим є забезпечення її автономним електроживленням. Система автоматики, насоси подачі реагенту та вентилятори скрубера повинні бути підключені до незалежного джерела безперебійного живлення або автоматично перемикається на резервний дизель-генератор у разі знеструмлення основної мережі. Крім технічної модернізації, необхідні й організаційні заходи. Це включає розробку та затвердження оновлених, детальних інструкцій щодо експлуатації нової системи та дій персоналу у разі аварії. Обов'язковим є проведення регулярних навчальних тренувань та протиаварійних навчань для всього оперативного та технічного персоналу. Поруч із входом на склад або у безпечній зоні мають бути постійно доступні ЗІЗ найвищого класу, включаючи ізолюючі протигази або фільтруючі протигази з новими, відповідними фільтрувальними коробками для хлору. Усі роботи з переоблаштування та введення в експлуатацію модернізованої системи мають суворо відповідати чинним державним будівельним нормам, вимогам охорони праці та бути оформлені відповідно до затвердженого проекту.

Таким чином, визначено критичну важливість переоблаштування стаціонарних систем осадження важких небезпечних газів, зокрема хлору, на промислових об'єктах для підвищення екологічної та промислової безпеки. Головною метою модернізації є суттєве збільшення оперативної ефективності, швидкості реагування та загальної надійності системи нейтралізації.

4.4. Особливості ліквідації надзвичайних ситуацій з викидом важких небезпечних газів під час воєнного стану

Ліквідація НС з викидом небезпечних газів під час воєнного стану має низку критичних особливостей, що значно ускладнюють процес і вимагають особливої координації та підходів. Головною відмінністю є подвійна загроза: хімічне зараження та воєнна небезпека, спричинена обстрілами та застосуванням дронів і ракет.

Безпека цивільного населення та рятувальників виходить на перший план. Слід негайно інформувати населення про хімічну загрозу та загрозу обстрілу. Місця укриття мають бути пристосовані не лише для захисту від ударних хвиль та уламків, а й забезпечувати герметизацію від проникнення небезпечних газів. Це вимагає використання фільтровентиляційних установок або швидкої герметизації дверей, вікон та вентиляційних отворів підручними засобами. Евакуація має проводитись виключно після оцінки обстановки та узгодження безпечних маршрутів, мінімізуючи час перебування на відкритій місцевості. Для рятувальників пункти управління операцією та місця базування резервних груп повинні розташовуватися у захищених спорудах. Особовий склад, що працює у зоні НС, повинен мати ЗІЗ високого класу (захисні костюми, протигазу) та бути додатково забезпечений бронежилетами та шоломами.

Табл. 4.10. Основні заходи ліквідації під час воєнного стану

Етап	Дії та особливості
Оповіщення	Одночасне оповіщення про хімічну та повітряну тривогу. Вказівки про герметизацію або евакуацію.
Розвідка	Пріоритет БПЛА для визначення концентрації, джерела витоку та напрямку поширення хмари.
Локалізація	Швидке перекриття витоку та осадження/нейтралізація хмари газу (водяна завіса, хімічні розчини). Роботи виконуються під прикриттям та з постійним моніторингом повітряної обстановки.
Евакуація	Проводиться лише через безпечні, незаражені та необстрілювані маршрути. Використання транспортних засобів з герметичними кабінами.
Деконтамінація	Обов'язкова та швидка санітарна обробка особового складу, техніки та майна після виходу з зони зараження, бажано в укритті або спеціально обладнаному місці з дотриманням правил маскування.

Загроза від обстрілів дронами та ракетами значно ускладнює логістику та безпеку операції. Використання дронів для хімічної розвідки (вимірювання концентрації газу, визначення зони зараження) стає критично важливим для мінімізації ризику для особового складу, хоча самі дрони можуть бути ціллю або зазнавати глушіння зв'язку (РЕБ). Необхідна постійна координація з військовими для отримання даних про повітряну обстановку. Роботи з ліквідації (перекриття витоків, осадження хмари) можуть бути перервані сигналами повітряної тривоги, що вимагає розробки чітких алгоритмів відходу в укриття та швидкого повернення до роботи. Ризик повторних ударів по місцях скупчення рятувальників вимагає децентралізації та використання менших, мобільних груп.

Проведення рятувальних робіт ускладнюється через зруйновану інфраструктуру (дороги, комунікації), що перешкоджає доставці спеціалізованої техніки, а також через можливі завали у зоні НС. Робота у засобах індивідуального захисту разом із бронежилетом та шоломом є фізично важкою, що додатково зменшує час ефективної роботи рятувальника у зоні зараження. Ключовими факторами є максимальна оперативність та мінімізація часу перебування в небезпечній зоні. Основні заходи включають одночасне оповіщення про хімічну та повітряну тривогу, пріоритет БПЛА для розвідки [122], швидку локалізацію витоків, евакуацію виключно через безпечні, незаражені та необстрілювані маршрути, а також обов'язкову санітарну обробку особового складу та техніки після виходу з зони зараження.

Особливе значення в умовах воєнного часу має координація дій рятувальників із військовими та поліцією. Військові (ЗСУ) надають критично важливу інформацію про повітряну обстановку та ракетну загрозу, що дозволяє силам ДСНС вчасно припинити роботи та відходити в укриття. Вони також можуть забезпечувати саперну перевірку території та об'єкта НС на наявність вибухонебезпечних предметів, що є обов'язковою передумовою для початку робіт. Також військові можуть допомагати у забезпеченні безпеки периметру та

наданням інженерної техніки у разі потреби. Поліція (Національна поліція) відповідає за управління дорожнім рухом на шляхах евакуації та маршрутах руху рятувальних колон, забезпечуючи їхню безперешкодність. Вони створюють зовнішній периметр безпеки для контролю доступу цивільних осіб, запобігання паніці та мародерству, а також активно допомагають у сповіщенні та організації укриття цивільного населення. Для ефективності операції необхідно створювати єдиний командний центр, де представники всіх трьох структур (ДСНС, військові, поліція) приймають спільні рішення на основі оперативних даних.

Таким чином, ліквідація НС з викидом небезпечних газів у воєнний період є вкрай складним процесом, що вимагає подолання подвійної загрози – хімічного зараження та постійної небезпеки від обстрілів дронами та ракетами, що критично впливає на безпеку та оперативність дій. Успіх ліквідації безпосередньо залежить від забезпечення герметизації та захисту укриттів як для цивільного населення, так і для рятувальників, швидкого використання БПЛА для розвідки, а також від бездоганної координації між силами ДСНС, військовими (для отримання інформації про повітряну обстановку та саперної перевірки) та поліцією (для управління дорожнім рухом, організації периметру безпеки та роботи з населенням) у рамках єдиного командного центру.

Висновки до розділу 4.

1. Встановлено, що економічний ефект при використанні запропонованого методу осадження хлору дрібнодисперсним потоком рідини з нейтралізуючими речовинами на прикладі викиду 20 тон хлору може досягати 40870 у.о. (1757,410 тис. грн. за курсом на 23.01.2026) без врахування екологічних збитків, врахування яких додатково збільшить цей показник.

2. Розроблено практичні рекомендації використання запропонованого методу прогнозування зони хімічного забруднення при викиді важких газів із додатковим описом повної процедури організації робіт при таких аваріях, яка

включає розвідку місця аварії, розгортання сил та засобів, осадження небезпечної хмари, утилізацію забрудненої рідини та проведення деконтамінації.

3. Визначено критичну важливість переоблаштування стаціонарних систем осадження важких небезпечних газів, зокрема хлору, на промислових об'єктах для підвищення екологічної та промислової безпеки. Головною метою модернізації є суттєве збільшення оперативної ефективності, швидкості реагування та загальної надійності системи нейтралізації.

4. Визначено особливості ліквідація НС з викидом небезпечних газів у воєнний період. Встановлено, що такий процес вимагає подолання подвійної загрози – хімічного зараження та постійної небезпеки від обстрілів дронами та ракетами, що критично впливає на безпеку та оперативність дій. Успіх ліквідації безпосередньо залежить від забезпечення герметизації та захисту укриттів як для цивільного населення, так і для рятувальників, швидкого використання БПЛА для розвідки, а також від бездоганної координації між силами ДСНС, військовими (для отримання інформації про повітряну обстановку та саперної перевірки) та поліцією (для управління дорожнім рухом, організації периметру безпеки та роботи з населенням) у рамках єдиного командного центру.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено важливу науково-практичну задачу у галузі цивільного захисту, а саме: розроблено метод прогнозування зони хімічного забруднення при викиді важких небезпечних газів в інтересах підвищення ефективності реагування на НС з викидом таких речовин із урахуванням активного осадження хмари небезпечної речовини з атмосферного повітря та хімічної нейтралізації небезпечних газів.

За підсумками виконаної наукової роботи зроблено наступні висновки:

1. Встановлено, що національна нормативна база України є структурованою та достатньою для регулювання процесів запобігання, реагування та ліквідації хімічних НС, забезпечуючи комплексний, багаторівневий та взаємопов'язаний характер системи ліквідації наслідків, що поєднує стратегічне управління з деталізованими інструкціями для практичного застосування. Хімічно небезпечні гази, важчі за повітря, зокрема, діоксид сірки, дихлорангідрид вугільної кислоти (фосген), пари соляної кислоти та хлор становлять значну небезпеку через їхню високу відносну густину, що сприяє повільному розсіюванню, скупченню в низинах та формуванню стійких осередків зараження приземного шару. Внаслідок відкритого воєнного нападу російської федерації на Україну, що триває з 24 лютого 2022 року, ризик виникнення аварій з викидом важких небезпечних газів, зокрема хлору, суттєво збільшився через загрозу як випадкового, так і навмисного руйнування промислових резервуарів ворогом, а також небезпеку застосування цих речовин (хлор, іприт, фосген тощо) як бойових отрутних речовин. З проведеного аналізу національних та світових підходів до прогнозування зон хімічного забруднення важкими небезпечними газами встановлено, що кожен з підходів має свої особливості. На сьогодні не існує методу прогнозування наслідків аварій з викидом важких небезпечних газів, який враховує можливість осадження важких небезпечних газів з атмосфери дисперсними потоками чистої води або води з хімічними нейтралізаторами.

2. Запропонована модель сорбції важких небезпечних газів дрібнодисперсним рідинним потоком, дозволяє врахувати основні параметри сорбції, параметри навколишнього середовища, параметри рідинного потоку, що подається на осадження та фізико-хімічні властивості рідини у цьому потоці. З аналізу результатів чисельного моделювання на прикладі газоподібного хлору встановлено, що при його осадженні визначальним параметром є константа Генрі, а не інтенсивність подачі рідинного потоку, як вважалось раніше. Це підтверджує нагальну потребу у використанні підрозділами ОРС ЦЗ хімічних нейтралізаторів при ліквідації аварій із викидом такої газоподібної небезпечної хімічної речовини в атмосферу. Побудовано математичну модель дифузійного розповсюдження в атмосфері важких небезпечних газів за умови паралельного протікання процесу їх примусового осадження дрібнодисперсним потоком рідини. Модель створено шляхом розв'язання рівнянь Нав'є-Стокса з відповідними граничними умовами. Особливістю побудованої моделі є врахування під час розповсюдження важкого небезпечного газу процесу його примусового осадження дрібнодисперсним потоком рідини різної інтенсивності. При цьому осадження відбувається за рахунок процесів сорбції важкого небезпечного газу краплинами рідини. Проведені дослідження хімічної активності нейтралізаторів та встановлено, що для практичного використання доцільно використання хімічних нейтралізаторів хлору гідроксид натрію або гідроксид кальцію. Це дозволило побудувати на основі моделі нейтралізації хлору дрібнодисперсним потоком чистої води модель хімічної нейтралізації хлору дрібнодисперсним потоком води з нейтралізатором. При дослідженій інтенсивності $2,0 \text{ л}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$ подачі дрібнодисперсного потоку та при концентрації $0,5 \text{ кг}/\text{кг}$ гідроксиду натрію у воді швидкість нейтралізації газоподібного хлору збільшується на 90% , а при концентрації $1,0 \text{ кг}/\text{кг}$ – на 140% .

3. Розроблено метод прогнозування зони хімічного забруднення при викиді важких небезпечних газів, який дозволяє інтегрувати математичні моделі динаміки важких небезпечних газів у практичну діяльність, забезпечує

прогнозування інтенсивності сорбції та розмірів зони хімічного забруднення у разі аварійного викиду. Розроблено лабораторну установку у вигляді камери для дослідження процесу сорбції важких небезпечних газів яка включає датчики газоаналізатору, що спроможні переміщуватися по вертикалі та газоаналізатор з блоком індикації. Проведено експериментальну перевірку адекватності розробленої моделі осадження та нейтралізації важких небезпечних газів дисперсним потоком рідини. Перевірка адекватності моделі та відтворюваності процесу дала позитивний результат. Результати розраховані з довірчою ймовірністю 0,95 за критерієм Фішера, що засвідчує достовірність розроблених моделей та методу. Ефективність запропонованого методу підтверджена розрахунковим шляхом у порівнянні із затвердженою методикою розрахунку. Встановлено, що внаслідок низького значення коефіцієнту дифузії хлору у повітрі за нормальних умов швидкість розповсюдження хлору на 65 % менша у порівнянні із аміаком. Зменшення розміру зони ураження хлору при його осадженні водою відбувається на 38 %, тоді як за аналогічних умов викиду та осадження аміаку розміри хмари зменшуються у 2,6 разів. Практичну реалізацію запропонованого алгоритму здійснено у вигляді комп'ютерної програми «Прогноз важких небезпечних газів».

4. Розраховано економічний ефект при використанні запропонованого методу осадження хлору дрібнодисперсним потоком рідини з нейтралізуючими речовинами на прикладі викиду 20 тон хлору. Встановлено, що він може досягати 40870 у.о. (1757,410 тис. грн. за курсом на 23.01.2026) без врахування екологічних збитків. Розроблено практичні рекомендації використання запропонованого методу прогнозування зони хімічного забруднення при викиді важких газів із додатковим описом повної процедури організації робіт при таких аваріях з урахуванням особливостей періоду воєнного стану. Встановлено, що такий процес вимагає подолання подвійної загрози – хімічного зараження та постійної небезпеки від обстрілів дронами та ракетами, що критично впливає на безпеку та оперативність дій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Pospelov B., Rybka E., Meleshchenko R., Borodych P., Gornostal S. Development of the method for rapid detection of hazardous atmospheric pollution of cities with the help of recurrence measures. *Eastern-European Journal of Enterprise*. 2019. Vol. № 1. No 10 (97). P. 29–35.
2. Russia still using chemical weapons in battle, expert say. URL: <https://www.thetimes.com/world/russia-ukraine-war/article/russia-novichok-in-battle-8tqbx7crn> (дата звернення 25.01.2026).
3. Pospelov B., Rybka E., Meleshchenko R., Krainiukov O., Harbuz S., Bezuhla Yu., Morozov I., Kuruch A., Saliyenko O., Vasylchenko R. Use of uncertainty function for identification of hazardous states of atmospheric pollution vector. *Eastern-European Journal of Enterprise*. 2020. Vol. 2. No 10 (104). P. 6–12.
4. Говаленков С. С., Басманов А. Е. Оценка интенсивности истечения опасных химических веществ из источника выброса. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2010. Вип. 11. С. 39–44.
5. Kustov M., Kalugin V., Levterov A. Rain scavenging of a radioactive aerosol atmospheric precipitation. *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*. 2016. № 3-4. P. 73-76.
6. Мельниченко А. С. Математичне та методичне забезпечення прогнозування хімічної обстановки при аваріях з викидом небезпечних газів: дис. ... доктора філософії: 263. – Харків, 2023. – 212 с.
7. Попов О. О., Яцишин А. В., Ковач В. О., Краснов Є. Б. Математична модель розсіювання забруднюючих речовин в атмосфері за умов неперервних викидів від хімічно небезпечних об'єктів. *Proceedings of XIII International Conference «Strategy of Quality in Industry and Education»*. Varna, Bulgaria, June 5-8 2017. Vol. 2. P. 129-134.
8. Crowley J. N., Ammann M., Cox R. A., Hynes R. G., Jenkin M. E., Mellouki A., Rossi M. J., Troe J., Wallington T. J. Evaluated kinetic and photochemical data for atmospheric chemistry: Vol. V Heterogeneous reactions on

solid substrates. *Atmosphere Chemistry and Physics*. 2010. Vol. 10. Iss.18. P. 9059–9223.

9. Rosenfeld D., Yu X., Liu G., Xu X., Zhu Y., Yue Z., Dai J., Dong Z. Glaciation activity of desert dust, air pollution and smoke from forest fires in convective clouds. Proceedings of the 10th WMO scientific conference on weather modification. Bali, Indonesia. 2011. P. 168-172.

10. Julin J., Shiraiwa M., Miles R., Reid J.P., Pöschl U., Riipinen I. Mass Accommodation of Water: Bridging the Gap Between Molecular Dynamics Simulations and Kinetic Condensation Models. *Journal of Physical Chemistry*. 2013. Vol. 117. Iss. 2. P. 410 – 420.

11. Про схвалення Стратегії реформування системи Державної служби з надзвичайних ситуацій: розпорядження КМУ від 25 січня 2017 р. №61-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/card/61-2017-p> (дата звернення 29.12.2025).

12. Закон України «Про правовий режим воєнного стану». Київ, 2015. 20 с. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/389-19#Text> (дата звернення 29.12.2025).

13. Lesko A., Kulakov O., Melnichenko A., Katunin A. Development and Implementation of an Algorithm for Predicting the Intensity of Sorption of Hazardous Gaseous Materials. *Solid State Phenomena*. 2024. Vol. 364. P. 101-112.

14. Lesko A., Kulakov O., Roianov O., Katunin A. Intensity of Neutralization of Dangerous Gases During Deposition with Small-Dispersion Water. *Advances in Science and Technology*. ISSN: 1662-0356. 2025. Vol. 170. P. 17-25.

15. Лесько А. С. Інтенсивність хімічної нейтралізації хлору при осадженні дрібнодисперсним рідинним потоком. *Комунальне господарство міст: науково-технічний збірник*. Серія: технічні науки та архітектура. 2024. Т. 6. № 187. С. 278-283.

16. Лесько А. С., Кулаков О. В., Домолега С. О. Модель примусового осадження важких небезпечних газів. *Проблеми надзвичайних ситуацій: науковий журнал*. Черкаси: НУЦЗ України. 2024. № 2 (40). С. 44-56.

17. Лесько А. С., Кулаков О. В., Катунін А. М., Маладика І. Г. Кінетика хімічної нейтралізації хлору дрібнодисперсним потоком води з нейтралізатором. *Проблеми надзвичайних ситуацій*: науковий журнал. Черкаси: НУЦЗ України. 2025. № 1 (41). С. 88-99.

18. Камера для дослідження процесу сорбції важких газів: пат. 159622 Україна. № 202405486; заявл. 20.11.2024; опубл. 18.06.2025, Бюл.№ 25/2025.

19. Лесько А. С. Програмний комплекс прогнозування наслідків аварій з викидом небезпечних газів. *Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту: матеріали міжнародної науково-практичної конференції молодих учених*. Харків: НУЦЗУ, 25-26.04.2024 р. С. 526.

20. Лесько А. С., Кулаков О. В., Мельниченко А. С., Катунін А. М. Реалізація алгоритму прогнозування інтенсивності сорбції небезпечних газоподібних матеріалів. *Problems of emergency situations: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції*. Харків: НУЦЗУ, 16.05.2024 р. С. 234-235.

21. Лесько А. С., Кулаков О. В. Дослідження процесів хімічної нейтралізації хлору при осадженні аварійного викиду. *Актуальність та особливості наукових досліджень в умовах воєнного стану: матеріали IV Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції з нагоди відзначення Дня науки-2024 в Україні*. Київ: Державний науково-дослідний інститут МВС України, 22.05.2024 р. С. 312-315.

22. Lesco A., Kulakov O. Prevention of chlorine leakage by deposition in the conditions of military aggression. *СБУ в умовах військової агресії: сучасні реалії та інноваційні стратегії забезпечення національної безпеки: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції*. Київ: Інститут Служби Безпеки України Національного юридичного університету імені Ярослава Мудрого, 4-5.07.2024 р. С. 153-155.

23. Лесько А. С., Кулаков О. В. Оперативні заходи реагування на надзвичайні ситуації, пов'язані з викидом хлору. *Об'єднання теорії та практики – запорука підвищення готовності оперативно-рятувальних*

підрозділів до виконання дій за призначенням: матеріали круглого столу. Харків: НУЦЗУ, 22.11.2024 р. С. 136-139.

24. Лесько А. С., Кулаков О. В. Дослідження процесів хімічної нейтралізації хлору при осадженні аварійного викиду. *Об'єднання теорії та практики – запорука підвищення готовності оперативно-рятувальних підрозділів до виконання дій за призначенням: матеріали круглого столу.* Харків: НУЦЗУ, 22.11.2024 р. С. 139-142.

25. Лесько А. С., Кулаков О. В. Математична модель розповсюдження важких газів у повітрі при примусовому осадженні. *Безпека людини у сучасних умовах: матеріали XVI Міжнародної науково-методичної конференції, Міжнародної наукової конференції Європейської Асоціації наук з безпеки (EAS).* Харків: НТУ «ХП», 6-7 грудня 2024 р. С.25-27.

26. Лесько А. С., Кулаков О. В. Сорбція важкого газу дрібнодисперсним потоком води при ліквідації надзвичайної ситуації. *Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції.* Львів: ЛДУБЖД, 13.12.2024 р. С.183-184.

27. Лесько А. С., Кулаков О. В. Дослідження ефективності осадження хімічно небезпечних газів дрібнодисперсним потоком води. *Запобігання виникненню надзвичайних ситуацій, реагування та ліквідація їх наслідки: матеріали круглого столу (вебінару).* Черкаси: НУЦЗУ, 28.02.2025 р.). С.58-59.

28. Лесько А. С., Кулаков О. В. Інтенсивність нейтралізації небезпечних газів водним потоком при ліквідації надзвичайної ситуації. *Актуальні проблеми діяльності складових сектору безпеки і оборони України в умовах особливих правових режимів: поточний стан та шляхи вирішення: матеріали II-ї Міжнародної науково-практичної конференції.* Харків: Національна академія Національної гвардії України, 20.03.2025 р. С. 348-350.

29. Лесько А. С. Математичне моделювання примусового осадження хлору дрібнодисперсним потоком води. *Проблеми та перспективи*

забезпечення цивільного захисту: матеріали міжнародної науково-практичної конференції молодих учених. Черкаси: НУЦЗУ, 16-18.04.2025 р. С. 266.

30. Лесько А. С., Кулаков О. В. Підвищення інтенсивності дегазації хлору при ліквідації надзвичайної ситуації. *Цивільний захист в умовах війни: матеріали I-ої Міжнародної науково-практичної конференції*. Львів: ЛДУБЖД, 17-18.04.2025 р.). С. 96-98.

31. Лесько А. С., Кулаков О. В. Інтенсивність нейтралізації небезпечних газів при осадженні дрібнодисперсною водою. *Problems of emergency situations: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції*. Харків: НУЦЗУ, 14.05.2025 р. С. 306-307.

32. Лесько А. С., Кулаков О. В. Математична модель хімічної нейтралізації хлору при ліквідації надзвичайної ситуації. *Безпека людини у сучасних умовах: матеріали XV Міжнародної науково-методичної конференції, Міжнародної наукової конференції Європейської Асоціації наук з безпеки (EAS)*. Харків: НТУ «ХП», 4-5.12.2025 р. С.31-33.

33. Рекомендації з захисту особового складу під час гасіння пожеж, що пов'язані з наявністю аміаку. Затверджені 08.05.1997. Київ, 1997. 42 с.

34. Рекомендації щодо захисту особового складу підрозділів пожежної охорони під час гасіння пожеж з наявністю хлору. Затверджені 18.01.2001. – Київ, 2001. 41 с.

35. Про затвердження Методики прогнозування наслідків розливу (викиду) хімічно небезпечних речовин при аваріях на промислових об'єктах і транспорті. Наказ МНС України від 27.03.2001 № 73/82/64/122. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0326-01> (дата звернення 29.12.2025).

36. Рекомендації щодо захисту особового складу підрозділів пожежної охорони під час гасіння пожеж за наявності мінеральних кислот (соляної, сірчаної, азотної, фосфорної тощо). Затверджені 19.02.2004. Київ, 2004. 49 с.

37. Про затвердження Рекомендацій щодо захисту особового складу підрозділів Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту МНС України під час гасіння пожеж та ліквідації наслідків аварій за наявності небезпечних

хімічних речовин (аміак, хлор, азотна, сірчана, соляна та фосфорна кислоти): Наказ МНС України від 13.10.2008 р. № 733. URL: <https://kyiv.dsns.gov.ua/upload/7/8/0/0/4/0/2021-3-17-733.pdf> (дата звернення 29.12.2025).

38. Про затвердження Рекомендацій щодо організації гасіння пожеж підрозділами МНС на промислових об'єктах підвищеної небезпеки з наявністю небезпечних хімічних речовин: Наказ МНС України від 29.09.2011 р. № 1017. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v1017735-11#Text> (дата звернення 29.12.2025).

39. Кодекс цивільного захисту України. Київ, 2012. 96 с. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/5403-17> (дата звернення 29.12.2025).

40. Статут дій органів управління та підрозділів Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту під час гасіння пожеж: Наказ МНС України від 26.04.2018 № 340. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0802-18#Text> (дата звернення 29.12.2025).

41. Статут дій у надзвичайних ситуаціях органів управління та підрозділів Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту: Наказ МНС України від 26.04.2018 № 340. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0801-18#Text> (дата звернення 29.12.2025).

42. Про затвердження Методики прогнозування наслідків вилливу (викиду) небезпечних хімічних речовин під час аварій на хімічно небезпечних об'єктах і транспорті: Наказ МНС від 29.11.2019 № 1000. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0440-20#Text> (дата звернення 29.12.2025).

43. Про затвердження Положення про єдину державну систему цивільного захисту: Постанова КМУ від 09.01.2014 № 11. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/11-2014-п#Text> (дата звернення 29.12.2025).

44. Про затвердження Порядку створення та використання матеріальних резервів (крім державних) для запобігання виникненню надзвичайних ситуацій і ліквідації їх наслідків: Постанова КМУ від 30.09.2015 № 775. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/775-2015-п#Text> (дата звернення 29.12.2025).

45. Про затвердження Загального положення про спеціальну Урядову комісію з ліквідації надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру: Постанова КМУ від 14.06.2002 № 843. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/843-2002-п#Text> (дата звернення 29.12.2025).

46. Про затвердження Порядку фінансування робіт із запобігання та ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій: Постанова КМУ від 04.02.1999 № 140. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/140-99-п#Text> (дата звернення 29.12.2025).

47. Про затвердження Правил безпеки та порядку ліквідації наслідків аварійних ситуацій з небезпечними вантажами при перевезенні їх залізничним транспортом: наказ Міністерства транспорту України від 16.10.2000 № 567. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0857-00#Text> (дата звернення 29.12.2025).

48. Рекомендації щодо запобігання отриманню особовим складом ДСНС хімічних опіків. Додаток до листа ДСНС від 10.10.2025 №341-25303/341.

49. Повітря. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Повітря> (дата звернення 29.12.2025).

50. Таблиця Менделєєва. URL: <https://cererra.com/blog/tablica-mendeleeva> (дата звернення 29.12.2025).

51. Бібліотека газів. URL: <https://gastech.com.ua/biblioteka-gaziv/> (дата звернення 29.12.2025).

52. Аміак. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Аміак> (дата звернення 29.12.2025).

53. Діоксид сірки. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Діоксид_сірки (дата звернення 29.12.2025).

54. Фосген. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Фосген> (дата звернення 29.12.2025).

55. Синильна кислота. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Синильна_кислота (дата звернення 29.12.2025).

56. Хлоридна кислота. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Хлоридна_кислота (дата звернення 29.12.2025).
57. Chlorine. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Chlorine> (дата звернення 29.12.2025).
58. SFPE (Society of Fire Protection Engineers) Handbook of Fire Protection Engineering: 5th edition / Morgan J. Hurley. Quincy: National Fire Protection Association, 2016. 3493 p.
59. Лур'є К. І. Деякі питання техногенної безпеки. Актуальні проблеми сучасної медицини. *Вісник ВДНЗУ «Українська медична стоматологічна академія»*. 2016. Т. 16. № 4 (56). С. 194-196.
60. Buts Y. U., Utkina K. B., Kulik M. I. [et al.]. Theoretical foundations of methodology for studying of emergency situation impacts on geosystems: Medzinárodná vedecká konferencia «Bezpečnostné forum 2012». *Zbornic vedeckych a odbornych prac*. Banská bystrica, 2012. P. 823-827.
61. Кустов М. В., Кіреєв О. О., Мельниченко А. С., Лещова В. А. Аналіз стану небезпеки на об'єктах зберігання хлору. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. Харків. 2020. Вип. 31. С. 198–210.
62. Про затвердження критеріїв, за якими оцінюється ступінь ризику від провадження господарської діяльності з виробництва особливо небезпечних хімічних речовин, перелік яких визначається кабінетом міністрів України, та визначається періодичність проведення планових заходів державного нагляду (контролю) міністерством захисту довкілля та природних ресурсів: Постанова Кабінету Міністрів України від 28.11.2018 № 1007. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1007-2018-п#Text> (дата звернення 29.12.2025).
63. Екологічний паспорт Харківської області за 2023 рік. URL: https://kharkivoda.gov.ua/content/documents/1282/128134/Attaches/ekologichniy_pasport_harkivskoyi_oblasti_2023_rik.pdf (дата звернення 29.12.2025).
64. Хімпром (фабрика) // Вікіпедія. URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Хімпром_\(фабрика\)](https://uk.wikipedia.org/wiki/Хімпром_(фабрика)) (дата звернення 29.12.2025).

65. Правила безпеки з хлором. Навчально-методичний центр цивільного захисту та безпеки життєдіяльності Черкаської області. URL: <https://nmc.dsns.gov.ua/upload/3/4/8/8/9/xlor.pdf> (дата звернення 29.12.2025).

66. ТОВ «Хлор плюс». URL: <https://www.ukraine.com.ua/ru/egrpou/41814166/> (дата звернення 29.12.2025).

67. Дегтярьова Л. М. Безпека життєдіяльності: методичні вказівки до виконання самостійної роботи студентів. Одеса, 2017. 74 с.

68. У Китаї 164 людини отруїлися хлором при аварії на хімзаводі. URL: https://gazeta.ua/articles/life/_u-kitayi-164-lyudini-otruyilisya-hlorom-pri-avariyi-na-himzavodi/119853 (дата звернення 29.12.2025).

69. У Києві стався викид хлору. URL: https://gazeta.ua/articles/life/_u-kiyevi-stavsya-vikid-hloru/358729 (дата звернення 29.12.2025).

70. На підприємстві Кривого Рогу стався витік хлору, госпіталізовано одну особу. URL: https://zn.ua/ukr/UKRAINE/poblizu-krivogo-rogu-stavsya-vitik-hloru-gospitalizovano-odnu-osobu-287297_.html (дата звернення 29.12.2025).

71. На підприємстві у США стався витік хлору. URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-world/2649965-na-pidpriemstvi-u-ssa-stavsya-vitik-hloru-ponad-50-osib-u-likarnah.html> (дата звернення 29.12.2025).

72. В Одесі стався витік хлору. URL: <https://ua.korrespondent.net/city/odessa/4422628-v-odesi-stavsya-vitik-khloru> (дата звернення 29.12.2025).

73. Іпр. Місто в Бельгії. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Іпр> (дата звернення 29.12.2025).

74. СОУ МНС 75.2-00013528-002:2010. Безпека у надзвичайних ситуаціях. Фільтрувальні засоби індивідуального захисту органів дихання населення у надзвичайних ситуаціях. Класифікація й загальні технічні вимоги. Київ, 2010. 16 с.

75. СОУ МНС 75.2-00013528-006:2011. Безпека у надзвичайних ситуаціях. Режим діяльності рятувальників, що використовують засоби індивідуального захисту під час ліквідування наслідків аварій на хімічно та радіаційного-небезпечних об'єктах. Загальні вимоги. Київ, 2011. 12 с.

76. United States Environmental Protection Agency. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/United_States_Environmental_Protection_Agency (дата звернення 29.12.2025).

77. List of atmospheric dispersion models. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_atmospheric_dispersion_models (дата звернення 29.12.2025).

78. AERMOD. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/AERMOD> (дата звернення 29.12.2025).

79. CALPUFF. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/CALPUFF> (дата звернення 29.12.2025).

80. Геоінформаційна система попередження надзвичайних ситуацій. URL: <https://magneticonemt.com/m1gis-geoinformatsijna-sistema-poperedzhennya-nadzvichajnih-situatsij/> (дата звернення 29.12.2025).

81. ALOHA Software. URL: <https://www.epa.gov/cameo/aloha-software> (дата звернення 29.12.2025).

82. Berry R. S., Rice S. A., Ross J. Physical chemistry. 2-nd edition. Oxford, 2000. 1064 p.

83. Довідник керівника гасіння пожежі / За загальною редакцією В. С. Кропивницького. Київ, 2016. 317 с.

84. Кустов М. В., Калугін В. Д. Прогнозування інтенсивності осадження газоподібних токсичних хімічних речовин атмосферними опадами. *East European Science Journal*. 2016. Вип. 2 (6). С. 52–59.

85. Kirby B. J. Micro- and Nanoscale Fluid Mechanics: Transport in Microfluidic Devices. New York, 2012. 494 p.

86. Viecele J., Roeselova M., Tobias D. J. Accommodation coefficients for water vapor at the air/water interface. *Chemical Physics Letters*. 2004. V. 393. Iss. 1-3. P. 249-255.

87. Davidovits P., Kolb C. E., Williams L. R. and other. Mass Accommodation and Chemical Reactions at Gas–Liquid Interfaces. *Chemical Reviews*. 2006. Vol. 106. Iss. 4. P. 1323-1354.

88. Мала гірнича енциклопедія: у 3-х т. / за ред. В. С. Білецького. Донецьк, 2004-2013. Т.1. 640 с.
89. Sander R. Compilation of Henry's Law Constants for Inorganic and Organic Species of Potential Importance in Environmental Chemistry. Mainz, 1999. 107 p.
90. Neutralisation of chlorine and sulphur dioxide. URL: <https://www.i4t.pl/en/technologies/neutralisation-of-chlorine-and-sulphur-dioxide> (дата звернення 29.12.2025).
91. СТВОЛИ PROTEK 360/366. URL: <http://protektfire.com.ua/pasporta-i-instruktsii/ukr.html> (дата звернення 29.12.2025).
92. Espenson J. H. Chemical Kinetics and Reaction Mechanisms. 2-nd edition. McGraw-Hill Book Company, 2002. 227 p.
93. Barbu A., Zhu S.-C. Monte Carlo Methods. Singapore, 2020. 422 p.
94. Kustov M., Melnychenko A., Basmanov O., Tarasenko O. Modeling of gas sorption process by dispersed liquid flow. *Materials Science Forum*. 2022. Vol. 1068. P. 239–247.
95. 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. No 10 (115). P. 31–40.
96. Dirac P. A. V. The Principles of Quantum Mechanics. 4-th edition. Oxford, 1967. 324 p.
97. Швидкість звуку. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Швидкість_звуку (дата звернення 29.12.2025).
98. Currie I. G. Fundamental Mechanics of Fluids. McGraw-Hill Book Company, 1974. 450 p.
99. Stetter H. J. Analysis of Discretization Methods for Ordinary Differential Equations. Berlin/Heidelberg/New York, 1973. 388 p.

100. Courant-Friedrichs-Lewy condition. Encyclopedia of Mathematics. Springer Science + Business Media GmbH. URL: https://encyclopediaofmath.org/wiki/Courant-Friedrichs-Lewy_condition (дата звернення 29.12.2025).

101. Hydrochloric acid. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrochloric_acid (дата звернення 29.12.2025).

102. Hypochlorous acid. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Hypochlorous_acid (дата звернення 29.12.2025).

103. Shell M. S. Thermodynamics and Statistical Mechanics: An Integrated Approach. Cambridge, 2015. 476 p.

104. 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.

105. Андронов В. А., Дівізінюк М. М., Калугін В. Д., Тютюник В. В. Науково-конструкторські основи створення комплексної системи моніторингу надзвичайних ситуацій в Україні: монографія. Харків, 2016. 319 с.

106. Kustov M., Slepuzhnikov E., Lipovoy V., Firdovsi D.I., Buskin O. Procedure for implementation of the method of artificial deposition of radioactive substances from the atmosphere. *Nuclear and Radiation Safety*. 2019. Vol. 83. No 3. P. 13–25.

107. Substance and/or heat exchanging tower: patent 5 616 289 US. № 692506; filed. 05.04.1996; data of patent 01.04.1997.

108. Камера для дослідження процесів масообміну: пат. 104957 Україна. № 201508952; заявл. 16.09.2015; опубл. 25.02.2016, Бюл. № 4/2016.

109. Камера для дослідження процесів сорбції газів: пат. 150432 Україна. № 202105395; заявл. 23.09.2021; опубл. 16.02.2022, Бюл. № 7/2022.

110. Freeman L., Ryan F., Kensler J., Dickinson R., Vining, G. A Tutorial on the Planning of Experiments. *Quality Engineering*, 2003. Vol. 25. Iss. 4. P. 315-332.

111. Грищук Ю. С. Основи наукових досліджень: навчальний посібник. Харків, 2008. 232 с.

112. Graupe D. Identification of systems. New York, 1976. 276 p.
113. Hogg R. V., McKean J. W., Craig A. T. Introduction to Mathematical Statistics. Pearson, 2019. 746 p.
114. Reenskaug T. MVC. Xerox PARC 1978-79. URL: <http://heim.ifi.uio.no/~trygver/themes/mvc/mvc-index.html> (дата звернення 29.12.2025).
115. Альбоцій О. В., Григоренко Н. В. Конспект лекцій з дисципліни “Економіка цивільного захисту”. Харків, 2005. 64 с.
116. Мікрофільтр (Мікрон). URL: <https://mikron.ua/ru/kontakty-2/> (дата звернення 29.12.2025).
117. Дімкомфорт. Вартість земляних робіт. URL: <https://dimkomfort.kyiv.ua/прайс-на-земляні-роботи> (дата звернення 29.12.2025).
118. International Public Safety Qualifications Authority (IPSQA). URL: <https://ipsqa.com/uk/hazmat/> (дата звернення 29.12.2025).
119. Industry group «Asfaltprom». URL: <https://asfaltprom.kharkov.ua/orenda-spetstekhniku-kharkiv-tsina-vartist> (дата звернення 29.12.2025).
120. Епіцентр. Каталог товарів. URL: <https://epicentrk.ua/ua/shop> (дата звернення 29.12.2025).
121. Мала гірнича енциклопедія: у 3-х т. / за ред. В. С. Білецького. Донецьк, 2004-2013. Т.2. 670 с.
122. Про затвердження Правил виконання польотів безпілотними авіаційними комплексами державної авіації України: наказ Міністерства оборони України 08.12.2016 № 661. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0031-17#Text> (дата звернення 29.12.2025).

ДОДАТОК А

Список публікацій за темою дисертації

Публікації у наукових фахових виданнях, проіндексованих у базах даних Web of ScienceCore Collection та/або Scopus:

1. Lesco A., Kulakov O., Melnichenko A., Katunin A. Development and Implementation of an Algorithm for Predicting the Intensity of Sorption of Hazardous Gaseous Materials. *Solid State Phenomena*. ISSN: 1662-9779. 2024. Vol. 364. P. 101-112. URL: <https://doi.org/10.4028/p-QJRa2J>.

2. Lesko A., Kulakov O., Roianov O., Katunin A. Intensity of Neutralization of Dangerous Gases During Deposition with Small-Dispersion Water. *Advances in Science and Technology*. ISSN: 1662-0356. 2025. Vol. 170. P. 17-25. URL: <https://doi.org/10.4028/p-z8MsON>.

Публікації у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України:

3. Лесько А. С. Інтенсивність хімічної нейтралізації хлору при осадженні дрібнодисперсним рідинним потоком. *Комунальне господарство міст: науково-технічний збірник*. Серія: технічні науки та архітектура. Харків, 2024. Т. 6. № 187. С. 278-283. DOI: 10.33042/2522-1809-2024-6-187-278-283. URL: <https://khg.kname.edu.ua/index.php/khg/article/view/6418/6339>

4. Лесько А. С., Кулаков О. В., Домолега С. О. Модель примусового осадження важких небезпечних газів. *Проблеми надзвичайних ситуацій: науковий журнал*. Черкаси: НУЦЗ України. 2024. № 2 (40). С. 44-56. DOI: 10.52363/2524-0226-2024-40-4. URL: <http://pes.nuczu.edu.ua/images/arhiv/40/4---40-.pdf>.

5. Лесько А. С., Кулаков О. В., Катунін А. М., Маладика І. Г. Кінетика хімічної нейтралізації хлору дрібнодисперсним потоком води з нейтралізатором. *Проблеми надзвичайних ситуацій: науковий журнал*. Черкаси: НУЦЗ України. 2025. № 1 (41). С. 88-99. DOI: 10.52363/2524-0226-2025-41-6. URL: <http://pes.nuczu.edu.ua/images/arhiv/41/6.pdf>.

Патент України на корисну модель:

6. Камера для дослідження процесу сорбції важких газів: пат. 159622, МПК В01D 53/18 (2006.01), В01D 47/10 (2006.01) / Толок І. В., Рибка Є. О., Кулаков О. В., **Лесько А. С.**, Федченко С. М. № и 2024 05486; заяв. 20.11.2024; опубл. 18.06.2025, Бюл. № 25. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/25393>.

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

7. **Лесько А. С.** Програмний комплекс прогнозування наслідків аварій з викидом небезпечних газів. *Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту: матеріали міжнародної науково-практичної конференції молодих учених*. Харків: НУЦЗУ, 25-26.04.2024 р. С. 526. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/20220>. (Форма участі – дистанційна).

8. **Лесько А. С.**, Кулаков О. В., Мельниченко А. С., Катунін А. М. Реалізація алгоритму прогнозування інтенсивності сорбції небезпечних газоподібних матеріалів. *Problems of emergency situations: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції*. Харків:, НУЦЗУ, 16.05.2024 р. С. 234-235. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/20211>. (Форма участі – дистанційна).

9. **Лесько А. С.**, Кулаков О. В. Дослідження процесів хімічної нейтралізації хлору при осадженні аварійного викиду. *Актуальність та особливості наукових досліджень в умовах воєнного стану: матеріали IV Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції з нагоди відзначення Дня науки-2024 в Україні*. Київ: Державний науково-дослідний інститут МВС України, 22.05.2024 р. С. 312-315. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/22229>. (Форма участі – дистанційна).

10. **Lesco A.**, Kulakov O. Prevention of chlorine leakage by deposition in the conditions of military aggression. *СБУ в умовах військової агресії: сучасні реалії та інноваційні стратегії забезпечення національної безпеки: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції*. Київ: Інститут Служби Безпеки

України Національного юридичного університету імені Ярослава Мудрого, 4-5.07.2024 р. С. 153-155. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/22230>. (Форма участі – дистанційна).

11. **Лесько А. С.**, Кулаков О. В. Оперативні заходи реагування на надзвичайні ситуації, пов'язані з викидом хлору. *Об'єднання теорії та практики – запорука підвищення готовності оперативно-рятувальних підрозділів до виконання дій за призначенням: матеріали круглого столу*. Харків: НУЦЗУ, 22.11.2024 р. С. 136-139. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/22836>. (Форма участі – дистанційна).

12. **Лесько А. С.**, Кулаков О. В. Дослідження процесів хімічної нейтралізації хлору при осадженні аварійного викиду. *Об'єднання теорії та практики – запорука підвищення готовності оперативно-рятувальних підрозділів до виконання дій за призначенням: матеріали круглого столу*. Харків: НУЦЗУ, 22.11.2024 р. С. 139-142. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/22837>. (Форма участі – дистанційна).

13. **Лесько А. С.**, Кулаков О. В. Математична модель розповсюдження важких газів у повітрі при примусовому осадженні. *Безпека людини у сучасних умовах: матеріали XVI Міжнародної науково-методичної конференції, Міжнародної наукової конференції Європейської Асоціації наук з безпеки (EAS)*. Харків: Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 6-7.12.2024 р. С.25-27. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/23336>. (Форма участі – дистанційна).

14. **Лесько А. С.**, Кулаков О. В. Сорбція важкого газу дрібнодисперсним потоком води при ліквідації надзвичайної ситуації. *Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції*. Львів:

Львівській державний університет безпеки життєдіяльності, 13.12.2024 р. С.183-184. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/23845>. (Форма участі – дистанційна).

15. **Лесько А. С.**, Кулаков О. В. Дослідження ефективності осадження хімічно небезпечних газів дрібнодисперсним потоком води. *Запобігання виникненню надзвичайних ситуацій, реагування та ліквідація їх наслідків: матеріали круглого столу (вебінару)*. Черкаси: НУЦЗУ, 28.02.2025 р. С.58-59. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/25049>. (Форма участі – дистанційна).

16. **Лесько А. С.**, Кулаков О. В. Інтенсивність нейтралізації небезпечних газів водним потоком при ліквідації надзвичайної ситуації. *Актуальні проблеми діяльності складових сектору безпеки і оборони України в умовах особливих правових режимів: поточний стан та шляхи вирішення: матеріали II-ї Міжнародної науково-практичної конференції*. Харків: Національна академія Національної гвардії України, 20.03.2025 р. С. 348-350. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/25050>. (Форма участі – дистанційна).

17. **Лесько А. С.** Математичне моделювання примусового осадження хлору дрібнодисперсним потоком води. *Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту: матеріали міжнародної науково-практичної конференції молодих учених*. Черкаси: НУЦЗУ, 16-18.04.2025 р. С. 266. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/25051>. (Форма участі – дистанційна).

18. **Лесько А. С.**, Кулаков О. В. Підвищення інтенсивності дегазації хлору при ліквідації надзвичайної ситуації. *Цивільний захист в умовах війни: матеріали I-ої Міжнародної науково-практичної конференції*. Львів: Львівській державний університет безпеки життєдіяльності, 17-18.04.2025 р. С. 96-98. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/25053>. (Форма участі – дистанційна).

19. **Лесько А. С.,** Кулаков О. В. Інтенсивність нейтралізації небезпечних газів при осадженні дрібнодисперсною водою. *Problems of emergency situations: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції*. Черкаси: НУЦЗУ, 14.05.2025 р. С. 306-307. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/25056>. (Форма участі – дистанційна).

20. **Лесько А. С.,** Кулаков О. В. Математична модель хімічної нейтралізації хлору при ліквідації надзвичайної ситуації. Безпека людини у сучасних умовах: матеріали XV Міжнародної науково-методичної конференції, Міжнародної наукової конференції Європейської Асоціації наук з безпеки (EAS). Харків: Національний технічний університет «Харківській політехнічний інститут», 4-5.12.2025 р. С.31-33. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/26580> (Форма участі – дистанційна).

ДОДАТОК Б

Акти впровадження результатів досліджень

**АКТ**

про впровадження результатів дисертаційної роботи
здобувача ступеня доктора філософії Андрія ЛЕСЬКО

Комісія у складі:

тимчасово виконуючого обов'язки заступника командира військової частини А0998
майора Івана ПАНКУЛИЧА,
начальника групи безпеки військової служби військової частини А0998 старшого
лейтенанта Олександра ЗАЯЦЯ,
командира взводу радіаційного, хімічного, біологічного захисту військової частини
А0998 старшого лейтенанта Андрія ЛИМАНСЬКОГО
склала цей акт про впровадження результатів дисертаційної роботи, виконаної в
Національному університеті цивільного захисту України здобувачем ступеня доктора
філософії Андрієм ЛЕСЬКО.

Комісія підтверджує, що висновки та результати, які були отримані в дисертаційній
роботі, а саме:

- алгоритм нейтралізації дрібнодисперсним рідинним потоком важких небезпечних газів,
- метод прогнозування зони хімічного забруднення при викиді важких небезпечних газів,
- пропозиції щодо практичної реалізації методики прогнозування зони хімічного забруднення при викиді важких небезпечних газів

впроваджено в практичну діяльність військової частини А0998 при проведенні РХБ-розвідки, виявленні, контролі й оцінці рівня хімічної загрози на територіях дій РХБ-підрозділу.

Цей акт не є підставою для отримання Андрієм ЛЕСЬКО будь-якої винагороди від військової частини А0998 Збройних Сил України за використання результатів його дисертаційної роботи.

Акт складений для подання у разову спеціалізовану вчену раду Національного університету цивільного захисту України у зв'язку із захистом Андрієм ЛЕСЬКО дисертації на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 263 – Цивільна безпека.

Тимчасово виконуючий обов'язки
заступника командира військової частини А0998 в пункті постійної дислокації
майор
Іван ПАНКУЛИЧ

Начальник групи безпеки військової служби
військової частини А0998
старший лейтенант
Олександр ЗАЯЦЬ

Командир взводу радіаційного, хімічного, біологічного захисту
військової частини А0998
старший лейтенант
Андрій ЛИМАНСЬКИЙ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Тимчасово виконуючий обов'язки
начальника аварійно-рятувального загону
спеціального призначення ГУ ДСНС України
у Харківській області



Володимир ЗЛОБІН

11 2025 р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи
здобувача ступеня доктора філософії Андрія ЛЕСЬКО

Комісія у складі:

заступника начальника загону із застосування інженерної техніки аварійно-рятувального загону спеціального призначення ГУ ДСНС України у Харківській області Андрія БУРІКА,

начальника групи радіаційного, хімічного та біологічного захисту аварійно-рятувального загону спеціального призначення ГУ ДСНС України у Харківській області Анастасії ОНАЦЬКОЇ


склала цей акт про впровадження результатів дисертаційної роботи, виконаної в Національному університеті цивільного захисту України здобувачем ступеня доктора філософії Андрієм ЛЕСЬКО.

Комісія підтверджує, що висновки та результати, які були отримані в дисертаційній роботі, а саме: метод прогнозування зони хімічного забруднення при викиді важких небезпечних газів, алгоритм нейтралізації дрібнодисперсним рідинним потоком важких небезпечних газів, пропозиції щодо практичної реалізації методики прогнозування зони хімічного забруднення при викиді важких небезпечних газів, впроваджено в практичну діяльність аварійно-рятувального загону спеціального призначення ГУ ДСНС України у Харківській області при організації аварійно-рятувальних робіт на хімічно-небезпечних об'єктах, де знаходяться важкі небезпечні гази (зокрема, хлор) з метою мінімізації наслідків надзвичайних ситуацій.

Цей акт не є підставою для отримання Андрієм ЛЕСЬКО будь-якої винагороди від Головного управління ДСНС України у Харківській області за використання результатів його дисертаційної роботи.

Акт складений для подання у разову спеціалізовану вчену раду Національного університету цивільного захисту України у зв'язку із захистом Андрієм ЛЕСЬКО дисертації на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 263 – Цивільна безпека.

Заступник начальника загону із
застосування інженерної техніки аварійно-
рятувального загону спеціального
призначення ГУ ДСНС України у
Харківській області

 Андрій БУРІК

Начальник групи радіаційного, хімічного та
біологічного захисту аварійно-рятувального
загону спеціального призначення ГУ ДСНС
України у Харківській області

 Анастасія ОНАЦЬКА

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор з навчальної роботи
 Національного університету цивільного
 захисту України,
 кандидат технічних наук, доцент



Олександр ДЖУЛАЙ

« 18 » _____ 11 _____ 2025 р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи
 здобувача Лесько Андрія Сергійовича
 у навчальний процес

Комісія у складі:

начальника кафедри радіаційного і хімічного захисту навчально-наукового інституту інженерної та спеціальної підготовки, к.т.н., доцента, полковника служби цивільного захисту Нуянзіна В.М.,

заступника начальника кафедри радіаційного і хімічного захисту навчально-наукового інституту інженерної та спеціальної підготовки, к.т.н., доцента, капітана служби цивільного захисту Чиркіной-Харламовой М.А.,

доцента кафедри радіаційного і хімічного захисту навчально-наукового інституту інженерної та спеціальної підготовки, к.т.н., доцента Журбинського Д.А.

Комісія підтверджує, що висновки та результати, які були отримані в дисертаційній роботі (зокрема, модель прогнозування розвитку надзвичайної ситуації з викидом важких небезпечних газів та алгоритм нейтралізації дрібнодисперсним рідинним потоком важких небезпечних газів), використовуються у навчально-виховному процесі при викладанні теми 1.10. Характеристика аварій з виливом (викидом) небезпечних хімічних речовин на промислових об'єктах і транспорті (Модуль 1. Радіаційний і хімічний захист населення і територій. Біологічний захист населення) обов'язковою професійної навчальної дисципліни «Радіаційний, хімічний та біологічний захист» за освітньо-професійною програмою «Цивільний захист» підготовки першого (бакалаврського) рівня вищої освіти у галузі знань К «Безпека та оборона» за спеціальністю К10 «Цивільна безпека».

Акт не є підставою для отримання Лесько Андрієм Сергійовичем будь-якої винагороди від Національного університету цивільного захисту України за використання результатів його дисертаційної роботи.

Акт складений для подання у разову спеціалізовану вчену раду у зв'язку із захистом Лесько Андрієм Сергійовичем дисертації на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 263 – цивільна безпека.



Віталій НУЯНЗІН



Марина ЧИРКІНА-ХАРЛАМОВА



Дмитро ЖУРБИНСЬКИЙ