

Національний університет цивільного захисту України
Державної служби України з надзвичайних ситуацій

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Мельниченко Андрій Сергійович

УДК 621.3

ДИСЕРТАЦІЯ

МАТЕМАТИЧНЕ ТА МЕТОДИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОГНОЗУВАННЯ
ХІМІЧНОЇ ОБСТАНОВКИ ПРИ АВАРІЯХ З ВИКИДОМ 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. Мельниченко

Науковий керівник

Кустов Максим Володимирович,

доктор технічних наук, доцент

Харків – 2023

АНОТАЦІЯ

Мельниченко А.С. Математичне та методичне забезпечення прогнозування хімічної обстановки при аваріях з викидом 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, Харків, 2023.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню важливого науково-практичного завдання у галузі цивільного захисту – розробці методики прогнозування зон хімічного забруднення при аваріях з викидом небезпечних газів в інтересах підвищення ефективності реагування на надзвичайні ситуації з викидом небезпечних хімічних речовин із врахуванням активного осадження хмари небезпечної речовини з атмосферного повітря.

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

У **першому розділі АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДИК ТА ПРИНЦИПІВ ПРОГНОЗУВАННЯ ТА ЛІКВІДАЦІЇ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ З ВИКИДОМ НЕБЕЗПЕЧНИХ ХІМІЧНИХ РЕЧОВИН** проведений аналіз нормативної бази України з питань ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій техногенного характеру, у тому числі на хімічно небезпечних об'єктах. Аналіз статистики виникнення та протікання процесу ліквідації надзвичайних ситуацій показав, що переважною причиною виникнення НС з викидом небезпечних хімічних речовин є людський фактор та зношення обладнання, а основною характеристикою таких аварій є швидке

розповсюдження зони ураження на велику площу. Виконано аналітичний огляд різних підходів до прогнозування зон хімічного забруднення, що застосовується в Україні та інших розвинених країнах світу, який дозволив виявити основну тенденцією розвитку систем прогнозування наслідків НС до автоматизації процесу розрахунку та інтеграція картографічних додатків до програмного комплексу прогнозування наслідків НС. Визначено, що на даний час не існує методик прогнозування наслідків аварій з викидом небезпечних хімічних речовин, який здатен враховувати процеси осадження небезпечних газів з атмосфери дисперсними потоками.

У другому розділі РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ПРОГНОЗУВАННЯ ХІМІЧНОЇ ОБСТАНОВКИ ПРИ АВАРІЯХ З ВИКИДОМ НЕБЕЗПЕЧНИХ ГАЗІВ проведено формалізовану постановку задачі моделювання процесів розповсюдження газів з атмосфери з їх паралельним осадженням. Визначено припущення, які використовуються в процесі моделювання. Проведено теоретичне моделювання та експериментальна перевірка сорбційних процесів небезпечних газів дисперсними потоками в атмосфері, як одного з ключових етапів процесу осадження газів з атмосфери. Розроблена математична модель розповсюдження небезпечного газу в атмосфері при його активному осадженні водними аерозолями дозволяє підвищити точність розрахунків розподілу концентрації газу в атмосфері при роботі стаціонарних та пересувних систем аерозольного осадження. Розроблена математична модель є системою із трьох рівнянь. Перше рівняння описує процес вільного розповсюдження газу після викиду із технологічного обладнання. Друге рівняння описує процес осадження газу із атмосфери дрібнодисперсним рідинним потоком з різною інтенсивністю. Третє рівняння описує процес вільного розсіювання газу в атмосфері після осадження. За допомогою комп'ютерного моделювання перевірена працездатність розробленою математичної моделі. Використання при моделюванні методу скінчених різниць дозволяє отримувати числові рішення просторового розподілу концентрації газу при його осадженні струменем довільної інтенсивності та

форми. Запропонований метод математичного опису процесу сорбції небезпечних газів дозволяє обирати довільну кількість та просторове розміщення вузлових точок, які задовольняють умові Куранта-Фрідрікса-Леві. Розроблено та обґрунтовано керуючий алгоритм методики прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів та його осадження дисперсними потоками, який базується на послідовності трьох блоків – моніторингу зони надзвичайної ситуації, прогнозування наслідків надзвичайної ситуації та прийняття управлінського рішення із включенням розрахунку розмірів зони хімічного ураження в залежності від кількості та послідовності етапів розповсюдження та осадження небезпечної речовини.

У **третьому розділі ПЕРЕВІРКА ДОСТОВІРНОСТІ МЕТОДИКИ ПРОГНОЗУВАННЯ ХІМІЧНОЇ ОБСТАНОВКИ ПРИ АВАРІЯХ З ВИКИДОМ НЕБЕЗПЕЧНИХ ГАЗІВ** з метою проведення експериментальних досліджень динаміки розповсюдження небезпечних газів під впливом дисперсних потоків та імітації повітря розроблено лабораторну установку та методику проведення досліджень на неї. Конструкційні особливості розробленої камери дозволяють забезпечити належну безпеку дослідників при роботі з небезпечними газами. Можливості дослідження сорбційних процесів забезпечуються для швидкості повітряного потоку в діапазоні від 0 до 6 м/с та дисперсності рідинного потоку до 0,1 мм. Результати досліджень просторового розподілу аміаку при різній інтенсивності повітряного потоку та різній інтенсивності дисперсного потоку води при осадженні підтвердили високу інтенсивність сорбції аміаку водою, що дозволило знизити концентрацію газу у 15-17 разів. Для слабозрозчинних у воді газів запропоноване використання хімічних нейтралізаторів для підтримання високої інтенсивності осадження газів з атмосфери. Результати експериментальних досліджень розраховані з надійністю 0,95 за критерієм Фішера, що засвідчує достовірність розроблених моделей та методики.

Встановлено, що використання запропонованої методики прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів, яка передбачає проведення моніторингу епіцентру викиду небезпечної хімічної речовини та зони розповсюдження хмари; прогнозування наслідків надзвичайної ситуації з урахуванням наявних ресурсів; прийняття управлінського рішення щодо ліквідації надзвичайної ситуації, дозволяє підвищити точність прогнозування зони хімічного ураження без осадження на 17% та при активному осадженні у 4 рази. На практичному прикладі показано, що запропонована методика дозволяє суттєво підвищити ефективність ліквідації хімічних аварій за рахунок більш інтенсивного осадження при мінімізації безпечної відстані для рятувальників та оптимізації інтенсивності подачі дисперсного потоку.

У четвертому розділі ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО ПРАКТИЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ МЕТОДИКИ ПРОГНОЗУВАННЯ ХІМІЧНОЇ ОБСТАНОВКИ ПРИ АВАРІЯХ З ВИКИДОМ НЕБЕЗПЕЧНИХ ГАЗІВ запропонована загальна система організації процес ліквідації надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів в атмосферу, яка включає проведення моніторингу для визначення вхідних параметрів, математичний апарат для розрахунків концентраційного розподілу небезпечних газів та процедуру практичної реалізації розробленого методу прогнозування в загальній системі цивільного захисту. Визначено, що характеристики струменів, що можна отримати за допомогою рятувального обладнання, обмежують використання розробленої методики для хмар з шириною понад 20 метрів та висотою більше 10 метрів. Запропонована багаторівнева система моніторингу, яка включає технічні елементи збору, обробки та передачі даних. Показано, що інтеграція запропонованої методики в загальну структуру управління при ліквідації надзвичайних ситуацій дозволяє проводити оцінку небезпеки при реальних умовах локалізації викиду, а підвищення точності та оперативності оцінки небезпек за допомогою запропонованої методики дозволить підвищити безпеку роботи

рятувальників в зоні аварії та заздалегідь організувати проведення евакуації населення із зони надзвичайної ситуації.

Розроблено практичні рекомендації для керівників ліквідації надзвичайних ситуацій на хімічно небезпечних об'єктах з викидом небезпечних хімічних речовин. Запропоновано алгоритм дій з організації аварійно-рятувальних робіт на хімічно небезпечних об'єктах, який передбачає проведення таких основних етапів ліквідації надзвичайної ситуації, як проведення розвідки, локалізація викиду небезпечної хімічної речовини, рятування людей, проведення евакуації та дегазація особового складу та техніки.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. *Удосконалено* математичну модель забруднення атмосферного повітря в результаті аварійних викидів небезпечних хімічних газів, яка, на відміну від існуючих моделей, враховує процес примусового осадження газу дрібнодисперсним рідинним потоком, що дозволяє визначати розподіл концентрації забруднюючих речовин в просторі та часі як на етапі розвитку надзвичайної ситуації так і в процесі її ліквідації в залежності від: тривалості та інтенсивності викиду, швидкості та напрямку вітру, температурного градієнту з висотою, коефіцієнтів турбулентної дифузії, температури повітря, місце розташування систем аерозольного осадження, інтенсивності та дисперсності водяного струменя, швидкості осадження небезпечних газів водяним потоком.

2. *Вперше розроблено* та створено діючий зразок експериментальної установки для дослідження процесів сорбції газів, яка складається із камери осадження із газовою форсункою для подачі небезпечних газів різної інтенсивності та їх відведення, системи газоаналізаторів для контролю просторового розподілу газів, блоку управління інтенсивністю подачі рідини на осадження та форсунок для корегування дисперсності рідинного потоку, яка реалізує можливість визначення інтенсивності осадження небезпечних газів дисперсними потоками та використання якої дозволило

експериментально підтвердити адекватність розробленої математичної моделі (Патент України №150432).

3. *Вперше розроблено та програмно реалізовано* методику прогнозування хімічної обстановки при аваріях з викидом небезпечних газів, що спирається на розроблену математичну модель забруднення атмосферного повітря в результаті аварійних викидів небезпечних газів та яка, на відміну від існуючих, дозволяє збирати та аналізувати моніторингову інформацію осередку викиду та зони поширення хмари небезпечного газу, прогнозувати розміри зони хімічного забруднення з урахуванням наявних ресурсів, визначати оптимальну кількість, місця розташування та параметри водяних струменів систем аерозольного осадження для ефективної ліквідації аварій та надзвичайних ситуацій із викидом небезпечних газів.

Практичне значення отриманих результатів полягає в розробці нових підходів до ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій на хімічно небезпечних об'єктах де відбуваються викиди небезпечних газів в атмосферне повітря. Розроблена в дисертації багатокритеріальна математична модель та програмні алгоритми її розв'язання можуть бути використані як основа для побудови комплексної автоматизованої програми для прогнозування наслідків викидів небезпечних газів в атмосферу.

Розроблена методика прогнозування хімічної обстановки при аваріях з викидом небезпечних газів може бути використана оперативно-рятувальними службами на рівні оперативно-координаційних центрів та штабів з ліквідації надзвичайних ситуацій при організації безпечної роботи рятувальників в зоні НС та при організації евакуації населення із потенційно небезпечних зон. Департаменти та відділи цивільного захисту територіальних органів державної влади можуть використовувати запропоновану методику прогнозування з метою розробки нових та уточнення існуючих планів з реагування на надзвичайні ситуації на хімічно небезпечних об'єктах та на територіях, що прилягають до таких об'єктів.

Основні наукові положення та висновки дисертаційної роботи доведено

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

Ключові слова: надзвичайні ситуації з викидом небезпечних речовин, газоподібні небезпечні хімічні речовини, осадження дисперсними потоками, сорбція газів рідиною, ліквідація надзвичайної ситуації, прогнозування зони хімічного забруднення атмосферного повітря, прогнозування наслідків надзвичайної ситуації, ефективність ліквідації надзвичайної ситуації.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, у яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Статті у наукових фахових виданнях України, що входять до міжнародних наукометричних баз:

1. Кустов М.В., Кірєєв О.О., Мельниченко А. С., Лещова В.А. Аналіз стану безпеки на об'єктах зберігання хлору. Проблеми надзвичайних ситуацій. Харків, 2020. Вип. 31. С. 198–210. (Включено до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Academic Research Index – ResearchBib, Ulrich's Periodicals Directory).

Здобувачу особисто належить аналіз статистики виникнення та протікання процесу ліквідації надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних хімічних речовин, обробка та аналіз результатів експериментальних досліджень.

2. Кустов М.В., Басманов О.Є., Мельниченко А.С. Моделювання зони хімічного ураження в умовах локалізації надзвичайної ситуації. Проблеми надзвичайних ситуацій. Харків, 2020. Вип. 32. С. 142–157. (Включено до

міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Academic Research Index – ResearchBib, Ulrich’s Periodicals Directory).

Здобувачу особисто належить аналітичний огляд різних підходів до прогнозування зон хімічного забруднення, формалізація задачі моделювання процесів розповсюдження газів з атмосфери з їх паралельним осадженням, визначення припущень, які використовуються в процесі моделювання, розробка керуючого алгоритму методики прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів.

3. Кустов М. В., Басманов О. Є., Тарасенко О. А., **Мельниченко А. С.** Прогнозування масштабів хімічного ураження за умов осадження небезпечної речовини. Проблеми надзвичайних ситуацій. Харків, 2021. Вип. 33. С. 72–83. (Включено до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Academic Research Index – ResearchBib, Ulrich’s Periodicals Directory).

Здобувачу особисто належить розробка математична модель розповсюдження небезпечного газу в атмосфері при його активному осадженні водними аерозолями, описує процес осадження газу із атмосфери дрібнодисперсним рідинним потоком з різною інтенсивністю.

4. **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. Volume 1 (10 (115)). P. 31–40. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.251675> (Включено до міжнародних наукометричних баз Scopus, DOAJ, EBSCOhost, BASE, CAS Source Index, ROAD, MIAR, CrossRef).

Здобувачу особисто належить розробка методики прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів, перевірка працездатності запропонованих математичних моделей динаміки небезпечних газів в атмосфері при їх активному осадженні.

5. Кустов М. В., **Мельниченко А. С.** Експериментальна перевірка моделі розповсюдження небезпечних газів при їх осадженні. Проблеми надзвичайних ситуацій. Харків, 2022. Вип. 35. С. 48–62. (Включено до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Academic Research Index – ResearchBib, Ulrich’s Periodicals Directory).

Здобувачу особисто належить розробка лабораторної установки для проведення експериментальних досліджень динаміки розповсюдження небезпечних газів під впливом дисперсних потоків та імітації повітря, проведення експериментальних досліджень та перевірка достовірності та ефективності методики прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів.

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав з напрямку, з якого підготовлено дисертацію:

6. Kustov M.V., **Melnychenko A.S.**, Taraduda D.V., Korogodska A.M. Research of the chlorine sorption processes when its deposition by water aerosol. Scientific journal «Materials Science Forum» Switzerland: Trans Tech Publications Ltd, 2021. Volume 1038. P. 361-373. (Включено до міжнародних наукометричних баз Scopus, Index Copernicus, Open Academic Journals Index, Ulrich’s Periodicals Directory, American Chemical Society, Bielefeld Academic Search Engine, CrossRef).

Здобувачу особисто належить теоретичне моделювання та інтерпретація експериментальних результатів щодо перевірки сорбційних процесів небезпечних газів дисперсними потоками в атмосфері.

7. Kustov M., **Melnychenko A.**, Basmanov O., Tarasenko O. Modeling of gas sorption process by dispersed liquid flow. Scientific journal «Materials Science Forum» Switzerland: Trans Tech Publications Ltd, 2022. Volume 1068. P. 239-247. <https://doi.org/10.4028/p-jdydlo> (Включено до міжнародних наукометричних баз Scopus, Index Copernicus, Open Academic Journals Index, Ulrich’s Periodicals Directory, American Chemical Society, Bielefeld Academic Search Engine, CrossRef).

Здобувачу особисто належить розробка методу розв’язання моделей прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів з використанням методу просторового розміщення вузлових точок, які задовольняють умові Куранта-Фрідріхса-Леві, порівняльний аналіз ефективності різних методик прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

8. **Мельниченко А.С.,** Кустов М.В. Моделювання зони хімічного ураження в умовах локалізації надзвичайної ситуації. The 11th International scientific and practical conference “Eurasian scientific congress” Barca Academy Publishing, м. Барселона, 3 листопада 2020 р. С. 24–31. (Форма участі – заочна інтернет-конференція).

Здобувачу особисто належить формалізована постановка задачі та визначення можливих припущень для моделювання процесу розповсюдження хмари небезпечної хімічної речовини.

9. **Мельниченко А.С.,** Кустов М.В. Розрахунок зони хімічного зараження при розливі НХР із залізничної цистерни. Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту: матер. Міжнародної науково-практичної конференції, м. Харків, НУЦЗУ, 27 лютого 2020 р. С. 87. (Форма участі – очна).

Здобувачу особисто належить перевірка працездатності розроблених математичних моделей на прикладі реальних аварій на хімічно небезпечних об’єктах.

10. **Мельниченко А.С.,** Кустов М.В. Аналіз причин виникнення надзвичайних ситуацій на об’єктах зберігання хлору. Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту: матер. Міжнародної науково-практичної конференції, м. Харків, НУЦЗУ, 27 лютого 2020 р. С. 86. (Форма участі – очна).

Здобувачу особисто належить збір та аналіз статистичних даних щодо надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних хімічних речовин, визначення домінуючих причин виникнення таких надзвичайних ситуацій та характерних рис їх розвитку.

11. Мельниченко А.С., Кустов М.В. Розв'язання рівняння розповсюдження небезпечних хімічних речовин у просторі при його осадженні. Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту: матер. Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, м. Харків, НУЦЗУ, 16 квітня 2021 р. С. 408. (Форма участі – очна).

Здобувачу особисто належить розв'язання рівняння розповсюдження небезпечних хімічних речовин в атмосфері у присутності дисперсних струменів для його осадження.

12. Мельниченко А.С., Кустов М.В. Вплив хімічної нейтралізації небезпечного газу на швидкість його осадження. Проблеми надзвичайних ситуацій: матер. Міжнародної науково-практичної конференції, м. Харків, НУЦЗУ, 20 травня 2021 р. С. 202. (Форма участі – очна).

Здобувачу особисто належить опис процесу хімічної нейтралізації слаботорозчинних у воді небезпечних газів, розрахунок оптимальної концентрації нейтралізуючих речовин у водному розчині.

13. Мельниченко А.С., Кустов М.В. Основні причини виникнення аварійних ситуацій, що супроводжуються витоком хлору. Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту: матер. круглого столу «Суб'єкти забезпечення цивільного захисту (регіонального та місцевого рівня) в реалізації завдань із запобігання та ліквідації наслідків НС», м. Харків, НУЦЗУ, 26 лютого 2021 р. С. 81. (Форма участі – очна).

Здобувачу особисто належить збір та аналіз надзвичайних ситуацій на об'єктах зберігання хлору, визначення основних причин виникнення аварійних ситуацій та характерних властивостей надзвичайних ситуацій із викидом небезпечних речовин в атмосферу.

14. **Мельниченко А.С.,** Кустов М.В. Прогнозування розмірів зони хімічного ураження за допомогою пакету математичних програм MAPLE. Безпека людини у сучасних умовах: Зб. наук. праць XIII Міжнародної науково-методичної конференції, 147 Міжнародної наукової конференції Європейської Асоціації наук з безпеки (EAS), м. Харків, НТУ "ХПІ", 03 грудня 2021 р. С. 78. (Форма участі – заочна).

Здобувачу особисто належить розробка програмного алгоритму для розрахунку розподілу концентрації небезпечних газів в атмосфері за допомогою розробленої системи математичних рівнян.

15. **Мельниченко А.С.** Технологія локалізації та знезараження парогазової фази хмари НХР. Матер. круглого столу (вебінару) «Запобігання надзвичайним ситуаціям та їх ліквідація», м. Харків, НУЦЗУ, 23 лютого 2022 р. С. 177. (Форма участі – інтернет-конференція).

16. **Мельниченко А.С.,** Кустов М.В. Принцип роботи камери для дослідження процесів сорбції газів. Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності : Зб. наук. праць XVII Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених, курсантів та студентів, м. Львів, ЛДУ БЖД, 04 березня 2022 р. С. 96. (Форма участі – заочна).

Здобувачу особисто належить розробка конструкції експериментальної лабораторної камери для дослідження динаміки розповсюдження небезпечних газів у повітряному потоці із паралельним осадженням дисперсними струменями.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

17. Пат. №150432 України, МПК В01D 53/18 (2006.01) Камера для дослідження процесів сорбції газів / Кустов М.В., **Мельниченко А.С.**, Слепужніков Є.Д., Чиркіна М.А., Хмиров І.М.; Демент М.О., Рагімов С.Ю. патентовласник: Національний університет цивільного захисту України. – № u202105395 від 16.02.2022.

ABSTRACT

Melnychenko A.S. Mathematical and methodological support for forecasting the chemical situation in accidents with the release of dangerous gases. – Qualifying research paper, manuscript copyright.

Dissertation for Candidate of Science Degree in Specialty 263 – civil safety. – National University of Civil Defence of Ukraine, State Emergency Service of Ukraine, Kharkiv, 2023.

The dissertation is devoted to the solution of an important scientific and practical task in the field of civil defense – the development of a methodology for forecasting the intensity of liquidation of emergency situations with the release of hazardous gases in the interest of increasing the efficiency of response to emergency situations at chemically hazardous facilities, taking into account the active deposition of a cloud of hazardous substances from the atmosphere.

The introduction presents 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, the connection of work with scientific programs is shown. Data on the applicant's personal contribution, approbation of work and publication are given.

In the first section of the ANALYSIS OF EXISTING METHODS AND PRINCIPLES OF FORECASTING AND LOCALIZATION OF EMERGENCY SITUATIONS AT CHEMICALLY HAZARDOUS OBJECTS, an analysis of the regulatory framework of Ukraine on liquidation of the consequences of man-made emergencies, including at chemically hazardous objects, was carried out. The analysis of the statistics of the emergence and progress of the process of liquidation of emergency situations showed that the main cause of emergencies at chemically hazardous facilities is the human factor and wear and tear of equipment, and the main characteristic of such accidents is the rapid spread of the affected area over a large area. An analytical review of various approaches to predicting chemical pollution zones, used in Ukraine and other developed countries of the world, was carried out, which allowed to identify the main trend in the development of

systems for predicting the consequences of natural disasters to the automation of the calculation process and the integration of cartographic applications into the software complex for forecasting the consequences of natural disasters. It was determined that currently there are no methods for predicting the consequences of accidents with the release of hazardous chemicals, which can take into account the processes of deposition of hazardous gases from the atmosphere by dispersed flows.

In the second section DEVELOPMENT OF METHODS FOR FORECASTING THE FORECASTING THE CHEMICAL SITUATION IN ACCIDENTS WITH THE RELEASE OF DANGEROUS GASES, a formal formulation of the problem of modeling the processes of diffusion of gases from the atmosphere with their parallel deposition was carried out. Assumptions used in the modeling process are defined. Theoretical modeling and experimental verification of the sorption processes of hazardous gases by dispersed flows in the atmosphere, as one of the key stages of the process of deposition of gases from the atmosphere, was carried out. The developed mathematical model of the spread of dangerous gas in the atmosphere during its active deposition by water aerosols allows to increase the accuracy of calculations of the distribution of gas concentration in the atmosphere during the operation of stationary and mobile aerosol deposition systems. The developed mathematical model is a system of three equations. The first equation describes the process of free diffusion of gas after emission from technological equipment. The second equation describes the process of deposition of gas from the atmosphere by a finely dispersed liquid stream with different intensity. The third equation describes the process of free dispersion of gas in the atmosphere after deposition. With the help of computer simulation, the performance of the developed mathematical model was verified. The use of the finite difference method in modeling allows obtaining numerical solutions of the spatial distribution of gas concentration when it is deposited by a jet of arbitrary intensity and shape. The proposed method of mathematical description of the process of sorption of dangerous gases allows choosing an

arbitrary number and spatial placement of nodal points that satisfy the Courant-Friedrichs-Levy condition. The management algorithm of the method of forecasting the intensity of elimination of emergency situations with the release of hazardous gases and its deposition by dispersed flows has been developed and substantiated, which is based on a sequence of three blocks - monitoring the emergency zone, forecasting the consequences of the emergency situation, and making a management decision, including the calculation of the size of the chemical damage zone depending on from the number and sequence of stages of spreading and deposition of a hazardous substance.

In the third section VERIFICATION OF THE RELIABILITY OF THE METHOD FOR FORECASTING THE CHEMICAL SITUATION IN ACCIDENTS WITH THE RELEASE OF DANGEROUS GASES in order to conduct experimental studies of the dynamics of the spread of dangerous gases under the influence of dispersed flows and air simulation, a laboratory installation and a methodology for conducting research on it were developed. The design features of the developed chamber allow to ensure proper safety of researchers when working with dangerous gases. The possibilities of studying sorption processes are provided for air flow speed in the range from 0 to 6 m/s and liquid flow dispersion up to 0.1 mm. The results of studies of the spatial distribution of ammonia at different intensities of the air flow and different intensities of the dispersed water flow during deposition confirmed the high intensity of ammonia sorption by water, which made it possible to reduce the gas concentration by 15-17 times. For gases that are poorly soluble in water, the use of chemical neutralizers is proposed to maintain a high intensity of deposition of gases from the atmosphere. The results of experimental studies are calculated with a reliability of 0.95 according to the Fisher criterion, which proves the reliability of the developed models and methods.

It was established that the use of the proposed methodology for forecasting the intensity of liquidation of emergency situations with the release of dangerous gases, which involves monitoring the epicenter of the release of a dangerous

chemical substance and the cloud spreading zone; forecasting the intensity of localization of an emergency situation taking into account the available resources; making a management decision to eliminate an emergency situation allows to increase the accuracy of forecasting the zone of chemical damage without deposition by 16% and with active deposition by 4 times. A practical example shows that the proposed method allows to significantly increase the efficiency of liquidation of chemical accidents due to more intensive deposition while minimizing the safe distance for rescuers and optimizing the intensity of the supply of dispersed flow.

The fourth section PROPOSALS FOR THE PRACTICAL IMPLEMENTATION OF THE METHOD FOR FORECASTING THE CHEMICAL SITUATION IN ACCIDENTS WITH THE RELEASE OF DANGEROUS GASES, the proposed general system of organizing the process of liquidation of emergency situations at chemically hazardous facilities with the emission of hazardous gases into the atmosphere, which includes monitoring to determine input parameters, mathematical apparatus for calculating concentration distributions of dangerous gases and the procedure for practical implementation of the developed forecasting method in the general system of civil protection. It was determined that the characteristics of the jets that can be obtained with the help of rescue equipment limit the use of the developed technique for clouds with a width of more than 20 meters and a height of more than 10 meters. A multi-level monitoring system is proposed, which includes technical elements of data collection, processing and transmission. It is shown that the integration of the proposed methodology into the general structure of management during the liquidation of emergency situations makes it possible to carry out a hazard assessment under real conditions of localization of the release, and increasing the accuracy and efficiency of hazard assessment with the help of the proposed method will make it possible to increase the safety of the work of rescuers in the accident area and to organize the evacuation of the population from emergency zones.

Practical recommendations have been developed for managers of emergency response at chemically hazardous facilities with the release of hazardous chemicals. An algorithm of actions for the organization of emergency rescue work at chemically hazardous objects is proposed, which provides for the implementation of such basic stages of liquidation of an emergency situation as reconnaissance, localization of the release of a dangerous chemical substance, rescue of people, evacuation and degassing of personnel and equipment.

Scientific novelty of the obtained results.

The multi-criteria mathematical model for forecasting the chemical situation in accidents with the release of dangerous gases was developed, which is built on the basis of the finite difference method using the Courant-Friedrichs-Levy condition and is a system of three equations, in which the first equation describes the process of free diffusion of gas after release from of technological equipment, the second equation describes the process of deposition of gas from the atmosphere by a finely dispersed liquid flow with different intensity, the third equation describes the process of free dispersion of gas in the atmosphere after deposition.

For the first time, a method of forecasting the intensity of the chemical situation in accidents with the release of dangerous gases was developed, which is based on the developed mathematical model of forecasting the intensity of the localization of emergency situations with the release of dangerous gases and involves the implementation of three procedures, namely: monitoring the epicenter of the release of a dangerous chemical substance and the cloud spreading zone; forecasting the intensity of localization of an emergency situation taking into account the available resources; making a management decision on liquidation of an emergency situation.

For the first time, a functional scheme of an experimental installation for the study of gas sorption processes was developed, which realizes the possibility of determining the intensity of deposition of hazardous gases by dispersed flows (Patent № 150432 Ukraine).

The practical significance of the results.

The scientific results of the dissertation are a further development in the development of approaches to the elimination of the consequences of emergency situations at chemically hazardous facilities where hazardous gases are emitted into the atmosphere. The multi-criteria mathematical model and software algorithms for its solution developed in the dissertation can be used as a basis for building a complex automated program for forecasting the consequences of emissions of hazardous gases into the atmosphere.

The developed method of forecasting the forecasting the chemical situation in accidents can be used by operational and rescue services at the level of operational coordination centers and headquarters for liquidation of emergency situations when organizing the safe work of rescuers in the emergency zone and when organizing the evacuation of the population from potentially dangerous areas. Departments and departments of civil protection of territorial state authorities can use the proposed forecasting methodology for the purpose of developing new and clarifying existing plans for responding to emergency situations at chemically hazardous facilities and the territories adjacent to such facilities.

The main scientific provisions and conclusions of the dissertation work have been brought to the level of specific action algorithms and applied recommendations. The results obtained in the dissertation can be used to optimize the process of monitoring the situation in the emergency zone and to simplify the work of the manager of emergency liquidation when making management decisions.

Keywords: emergency situations at chemically hazardous facilities, gaseous hazardous chemical substances, deposition by dispersed flows, sorption of gases by liquid, intensity of liquidation of an emergency situation, forecasting of a zone of chemical pollution of the atmosphere, forecasting of the consequences of an emergency situation, efficiency of liquidation of an emergency situation.

LIST OF PUBLICATIONS OF DEGREE-SEEKER

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

Articles in scientific professional editions of Ukraine included in the international science-computer bases:

1. Kustov M.V., Kireev O.O., **Melnychenko A.S.**, Leschova V.A. (2020) Analysis of the state of danger at chlorine storage facilities. [Analiz stanu nebezpeky na ob'yektakh zberihannya khloru]. Problemy nadzvychnykh sytuatsiy - Problems of emergency situations. Issue 31. P. 198–210. [in Ukraine]. (The article in the international science-based database Index Copernicus, Academic Research Index - ResearchBib, Ulrich's Periodicals Directory).

The acquirer is personally responsible for the analysis of the statistics of the occurrence and progress of the process of liquidation of emergency situations at chemically hazardous facilities, processing and analysis of the results of experimental studies.

2. Kustov M.V., Basmanov O.E., *Melnychenko A.S.* (2020) Modelyuvannya zony khimichnoho urazhennya v umovakh lokalizatsiyi nadzvychnoyi sytuatsiyi. [Modeling of the zone of chemical damage in the conditions of localization of an emergency situation]. Problemy nadzvychnykh sytuatsiy - Problems of emergency situations. Issue 32. P. 142–157. [in Ukraine]. (The article in the international science-based database Index Copernicus, Academic Research Index - ResearchBib, Ulrich's Periodicals Directory).

The acquirer is personally responsible for an analytical review of various approaches to forecasting areas of chemical pollution, formalization of the task of modeling the processes of diffusion of gases from the atmosphere with their parallel deposition, determination of assumptions used in the modeling process,

development of a control algorithm for the methodology of forecasting the intensity of liquidation of emergency situations with the release of hazardous gases.

3. Kustov M.V., Basmanov O.E., Tarasenko O.A., **Melnychenko A.S.** (2021) Prohnozuvannya masshtabiv khimichnoho urazhennya za umov osadzhennya nebezpechnoyi rehovyny. [Forecasting the scale of chemical damage under conditions of deposition of a hazardous substance]. Problemy nadzvychnykh sytuatsiy - Problems of emergency situations. Issue 33. P. 72–83. [in Ukraine]. (The article in the international science-based database Index Copernicus, Academic Research Index - ResearchBib, Ulrich's Periodicals Directory).

The acquirer personally owns the development of a mathematical model of the spread of hazardous gas in the atmosphere during its active deposition by water aerosols, which describes the process of deposition of gas from the atmosphere by a finely dispersed liquid stream of varying intensity.

4. **Melnichenko A.**, Kustov M., Basmanov O., Tarasenko O., Bogatov O., Kravtsov M., Petrova O., Pidpala T., Karatieieva O., Shevchuk N. (2022) Devising a procedure to forecast the level of chemical damage to the atmosphere during active deposition of dangerous gases. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Volume 1 (10 (115)). P. 31–40. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.251675> (The article in the international science-based Scopus, DOAJ, EBSCOhost, BASE, CAS Source Index, ROAD, MIAR, CrossRef).

The acquirer is personally responsible for the development of a methodology for forecasting the intensity of liquidation of emergency situations with the release of hazardous gases, checking the performance of the proposed mathematical models of the dynamics of hazardous gases in the atmosphere during their active deposition.

5. Kustov M.V., **Melnychenko A.S.** (2022) Eksperymental'na perevirka modeli rozpovsyudzhennya nebezpechnykh haziv pry yikh osadzhenni. [Experimental verification of the model of diffusion of hazardous gases during their deposition]. Problemy nadzvychnykh sytuatsiy - Problems of emergency

situations. Issue 35. P. 72–83. [in Ukraine]. (The article in the international science-based database Index Copernicus, Academic Research Index - ResearchBib, Ulrich's Periodicals Directory).

The acquirer personally owns the development of a laboratory installation for conducting experimental studies of the dynamics of the spread of dangerous gases under the influence of dispersed flows and air simulation, conducting experimental studies and checking the reliability and effectiveness of the methodology for forecasting the intensity of liquidation of emergency situations with the release of dangerous gases.

Articles in the abroad scientific professional editions, included in the international science-computer bases:

6. Kustov M.V., **Melnychenko A.S.**, Taraduda D.V., Korogodska A.M. (2021) Research of the chlorine sorption processes when its deposition by water aerosol. Scientific journal "Materials Science Forum" Switzerland: Trans Tech Publications Ltd. Volume 1038. P. 361-373. (The article in the international science-based database Scopus, Index Copernicus, Open Academic Journals Index, Ulrich's Periodicals Directory, American Chemical Society, Bielefeld Academic Search Engine, CrossRef).

The acquirer is personally responsible for the theoretical modeling and interpretation of experimental results regarding verification of the sorption processes of hazardous gases by dispersed streams in the atmosphere.

7. Kustov M., **Melnychenko A.**, Basmanov O., Tarasenko O. Modeling of gas sorption process by dispersed liquid flow. Scientific journal "Materials Science Forum" Switzerland: Trans Tech Publications Ltd. Volume 1068. P. 239 - 247. <https://doi.org/10.4028/p-jdydlo> (The article in the international science-based database Scopus, Index Copernicus, Open Academic Journals Index, Ulrich's Periodicals Directory, American Chemical Society, Bielefeld Academic Search Engine, CrossRef).

The applicant personally owns the development of a method of solving models for forecasting the intensity of emergency liquidation using the method of spatial placement of nodal points that satisfy the Courant-Friedrichs-Levy condition, a comparative analysis of the effectiveness of different methods of forecasting the intensity of emergency liquidation.

Scientific works certifying the practical of the dissertation materials:

8. **Melnychenko A.S.**, Kustov M.V. (2020) Modelyuvannya zony khimichnoho urazhennya v umovakh lokalizatsiyi nadzvychnoyi sytuatsiyi. [Modeling of the zone of chemical damage in the conditions of localization of an emergency situation]. The 11th International scientific and practical conference “Eurasian scientific congress” Barca Academy Publishing, Barcelona, November 3, 2020, P. 24–31. (The form of participation is a extramural Internet conference).

The acquirer personally owns the formalized statement of the problem and the definition of possible assumptions for modeling the process of spreading a cloud of a dangerous chemical substance.

9. **Melnychenko A.S.**, Kustov M.V. (2020) Rozrakhunok zony khimichnoho zarazhennya pry rozlyvi NKHR iz zaliznychnoyi tsystemy. [Calculation of the zone of chemical contamination in case of spillage of HM from a railway tank]. Problemy ta perspektyvy zabezpechennya tsyvil'noho zakhystu: mater. Mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi. - Problems and prospects of providing civil protection: mater. of the International Scientific and Practical Conference, Kharkiv, NUCZU, February 27, 2020, P. 87. (Participation form – intramural).

The applicant is personally responsible for checking the performance of the developed mathematical models on the example of real accidents at chemically hazardous facilities.

10. **Melnychenko A.S.**, Kustov M.V. (2020) Analiz prychny vynyknennya nadzvychnykh sytuatsiy na ob"yektakh zberihannya khloru. [Analysis of the causes of emergency situations at chlorine storage facilities]. Problemy ta perspektyvy zabezpechennya tsyvil'noho zakhystu: mater. Mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi. - Problems and prospects of providing civil protection: mater. of the International Scientific and Practical Conference, Kharkiv, NUCZU, February 27, 2020, P. 86. (Participation form – intramural).

The acquirer is personally responsible for the collection and analysis of statistical data on emergency situations at chemically hazardous facilities, the determination of the dominant causes of such emergency situations and the characteristic features of their development.

11. **Melnychenko A.S.**, Kustov M.V. (2021) Rozv"yazannya rivnyannya rozpovsyudzhennya nebezpechnykh khimichnykh rehovyn u prostori pry yoho osadzhenni. [Solving the equation for the distribution of hazardous chemicals in space during their deposition]. Problemy ta perspektyvy zabezpechennya tsyvil'noho zakhystu: mater. Mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi molodykh uchenykh. - Problems and prospects of providing civil protection: mater. of the International Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Kharkiv, NUCZU, April 16, 2021, P. 408. (Participation form – intramural).

The collector is personally responsible for solving the equation for the distribution of hazardous chemicals in the atmosphere in the presence of dispersed jets for its deposition.

12. **Melnychenko A.S.**, Kustov M.V. (2021) Vplyv khimichnoyi neytralizatsiyi nebezpechnoho hazu na shvydkist' yoho osadzhennya. [The effect of chemical neutralization of a hazardous gas on the rate of its deposition]. Problemy nadzvychnykh sytuatsiy: mater. Mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi. - Problems of emergency situations: mater. of the International Scientific and Practical Conference, Kharkiv, NUCZU, May 20, 2021, P. 202. (Participation form – intramural).

The acquirer personally owns the description of the process of chemical neutralization of poorly soluble in water dangerous gases, the calculation of the optimal concentration of neutralizing substances in the aqueous solution.

13. **Melnychenko A.S.**, Kustov M.V. (2021) Osnovni prychny vynyknennya avarynykh sytuatsiy, shcho suprovodzhuyut'sya vytokom khloru. [The main causes of emergency situations accompanied by chlorine leakage]. Problemy ta perspektyvy zabezpechennya tsyvil'noho zakhystu: mater. kruhloho stolu «Sub'yekty zabezpechennya tsyvil'noho zakhystu (rehional'noho ta mistsevoho rivnya) v realizatsiyi zavdan' iz zapobihannya ta likvidatsiyi naslidkiv NS». - Problems and prospects of providing civil protection: mater. round table "Subjects of civil protection (regional and local level) in the implementation of the tasks of prevention and liquidation of the consequences of natural disasters", Kharkiv, NUCZU, February 26, 2021, P. 81. (Participation form – intramural).

The acquirer is personally responsible for the collection and analysis of emergency situations at chlorine storage facilities, the determination of the main causes of emergency situations and the characteristic properties of emergency situations with the release of hazardous substances into the atmosphere.

14. **Melnychenko A.S.**, Kustov M.V. (2021) Prohnozuvannya rozmiriv zony khimichnoho urazhennya za dopomohoyu paketu matematychnykh proham MAPLE. [Prediction of the size of the zone of chemical damage using the MAPLE mathematical program package]. Bezpeka lyudyny u suchasnykh umovakh: Zb. nauk. prats' KHIII Mizhnarodnoyi naukovo-metodychnoyi konferentsiyi, 147 Mizhnarodnoyi naukovoyi konferentsiyi Yevropeys'koyi Asotsiatsiyi nauk z bezpeky (EAS). - Human safety in modern conditions: Collection. of science Proceedings of the 13th International Scientific and Methodological Conference, 147th International Scientific Conference of the European Association of Security Sciences (EAS), Kharkiv, KhPI National Technical University, December 3, 2021, P. 78. (Participation form – intramural).

The applicant is personally responsible for the development of a software algorithm for calculating the distribution of the concentration of hazardous gases in the atmosphere using the developed system of mathematical equations.

15. **Melnychenko A.S.** (2022) Tekhnolohiya lokalizatsiyi ta znezarazhennya parohazovoyi fazy khmary NKHR. [The technology of localization and decontamination of the steam-gas phase of the HM cloud]. Mater. kruhloho stolu «Zapobihannya nadzvychaynym sytuatsiyam ta yikh likvidatsiya». - Mater. of the round table "Prevention of emergency situations and their liquidation", Kharkiv, NUCZU, February 23, 2022, P. 177. (Participation form – intramural).

16. **Melnychenko A.S.**, Kustov M.V. (2022) Pryntsyp roboty kamery dlya doslidzhennya protsesiv sorbtsiyi haziv. [The principle of operation of the chamber for the study of gas sorption processes]. Problemy ta perspektyvy rozvytku systemy bezpeky zhyttyediyal'nosti : Zb. nauk. prats' XVII Mizhnarodnoyi nauk.-prakt. konferentsiyi molodykh vchenykh, kursantiv ta studentiv, m. L'viv, LDU BZHD. - Problems and prospects of the development of the life safety system: Collection. of science Proceedings of the XVII International Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Cadets and Students, Lviv, LSU SL, March 4, 2022, P. 96. (Participation form – intramural).

The acquirer personally owns the development of the design of an experimental laboratory chamber for studying the dynamics of the spread of dangerous gases in an air stream with parallel deposition by dispersed jets.

Scientific works, which additionally reflect the scientific results of the dissertation:

17. Patent. 150432 Ukraine, IPC B01D 53/18 (2006.01) Kamera dlya doslidzhennya protsesiv sorbtsiyi haziv [Chamber for the study of gas sorption processes] / Kustov M.V., **Melnychenko A.S.**, Slepuzhnikov E.D., Chirkina M.A., Khmyrov I.M.; Dement M.O., Rahimov S.Yu.; patent holder: National University of Civil Defense of Ukraine. № u202105395 at 16.02.2022.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	30
ВСТУП.....	31
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДИК ТА ПРИНЦИПІВ ПРОГНОЗУВАННЯ ТА ЛІКВІДАЦІЇ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ З ВИКИДОМ НЕБЕЗПЕЧНИХ ХІМІЧНИХ РЕЧОВИН.	40
1.1. Аналіз нормативної бази України щодо ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних хімічних речовин...	40
1.1.1. Класифікації надзвичайних ситуацій техногенного характеру з викидом небезпечних хімічних речовин.....	40
1.1.2. Правові основи організації ліквідації надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних хімічних речовин в Україні.....	45
1.2. Аналіз особливостей розвитку та ліквідації надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних хімічних речовин	51
1.2.1. Аналіз джерел небезпеки при надзвичайних ситуаціях з викидом небезпечних хімічних речовин	51
1.2.2. Особливості організації процесу ліквідації надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних хімічних речовин	58
1.3. Існуючі методики прогнозування наслідків викидів небезпечних хімічних речовин при надзвичайних ситуаціях техногенного характеру.....	64
1.3.1. Математичні моделі прогнозування наслідків викидів небезпечних хімічних речовин при надзвичайних ситуаціях.....	65
1.3.2. Методики прогнозування хімічної обстановки при аваріях з викидом небезпечних хімічних речовин в Україні.....	69
1.3.3. Методики прогнозування хімічної обстановки при аваріях з викидом небезпечних хімічних речовин в країнах світу.....	74
Висновки до розділу 1.....	84

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ПРОГНОЗУВАННЯ ХІМІЧНОЇ ОБСТАНОВКИ ПРИ АВАРІЯХ З ВИКИДОМ НЕБЕЗПЕЧНИХ ГАЗІВ	86
2.1. Математична модель прогнозування хімічної обстановки при аваріях з викидом небезпечних газів	86
2.1.1. Формалізація задачі просторового розподілу концентрації газу при викиді з точкового джерела	87
2.1.2. Моделювання сорбційних процесів небезпечних газів дисперсними потоками	89
2.1.3. Розробка математичної моделі прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів	103
2.1.4. Розробка способу розв'язання математичної моделі прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів	109
2.2. Розробка управляючого алгоритму методики прогнозування хімічної обстановки при аваріях з викидом небезпечних газів	117
2.3. Розробка програмної реалізації методики прогнозування хімічної обстановки при аваріях з викидом небезпечних газів.....	120
Висновки до розділу 2.....	123
РОЗДІЛ 3. ПЕРЕВІРКА ДОСТОВІРНІСТЬ МЕТОДИКИ ПРОГНОЗУВАННЯ ХІМІЧНОЇ ОБСТАНОВКИ ПРИ АВАРІЯХ З ВИКИДОМ НЕБЕЗПЕЧНИХ ГАЗІВ	125
3.1. Розробка лабораторної установки та методики проведення досліджень динаміки осадження небезпечних газів дисперсними потоками	125
3.2. Експериментальна перевірка достовірності отриманих математичних моделей	131
3.2.1. Експериментальна перевірка достовірності математичних моделей сорбції небезпечних газів дисперсними рідинними	131

потоками.....	
3.2.2. Експериментальна перевірка достовірності математичної моделі прогнозування хімічної обстановки при аваріях з викидом небезпечних газів	136
3.3. Оцінка ефективності методики прогнозування хімічної обстановки при аваріях з викидом небезпечних газів	141
Висновки до розділу 3.....	145
РОЗДІЛ 4. ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО ПРАКТИЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ МЕТОДИКИ ПРОГНОЗУВАННЯ ХІМІЧНОЇ ОБСТАНОВКИ ПРИ АВАРІЯХ З ВИКИДОМ НЕБЕЗПЕЧНИХ ГАЗІВ	147
4.1. Розробка системи організації процесу ліквідації надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів.....	147
4.2. Рекомендації керівникам ліквідації надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів.....	160
Висновки до розділу 4.....	172
ВИСНОВКИ.....	173
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	177
ДОДАТОК А Список публікацій за темою дисертації.....	195
ДОДАТОК Б Лістинги програми розрахунку концентраційних полів небезпечних газів.....	202
ДОДАТОК В Акти впровадження результатів досліджень.....	208

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ALOHA - Areal Locations of Hazardous Atmospheres;
GPS – General Position System;
KM-GAP – kinetic multilayer model for gas?particle;
MD – molecular dynamics;
WMA – The Weather Modification Association;
WMO – World Meteorological Organization;
АМРК – автоматизований метеорологічний радіокомплекс;
БПЛА – безпілотний літаючий апарат;
ГДК – гранично допустима концентрація;
ДСМД – Державна система моніторингу довкілля;
ДСНС – Державна служба України з надзвичайних ситуацій;
ЄДС ЦЗ – Єдина державна система цивільного захисту;
ЗМХЗ - зони в межах зони можливого хімічного зараження;
КНС – класифікатор надзвичайних ситуацій;
КМУ – Кабінет Міністрів України;
МРЛ – метеорологічний радіолокатор;
НС – надзвичайні ситуації;
НХР – небезпечні хімічні речовини;
НУЦЗЦ – Національний університет цивільного захисту України;
ПЗХЗ - прогнозована зона хімічного зараження;
СВСП - ступеня вертикальної стійкості повітря;
ПАР – поверхнево-активна речовина;
ПВХ – полівінілхлорид;
ПНО – потенційно небезпечний об'єкт;
США – Сполучені Штати Америки.

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Сучасний стан промисловості вимагає використання великої кількості різноманітних хімічних речовин. Навіть за умов нормальної роботи промислових підприємств у навколишнє середовище викидається велика кількість небезпечних хімічних речовин. Основними об'єктами навколишнього середовища на які чинять негативний вплив небезпечні речовини є повітря, вода та ґрунт. Особливо масштабні викиди відбуваються у разі виникнення на таких об'єктах масштабних аварій. Незважаючи на значні зусилля по дотриманню правил безпечної експлуатації на об'єктах та підприємствах, де виготовляються, зберігаються та використовуються небезпечні хімічні речовини виникають аварійні ситуації. Надзвичайні ситуації (НС) з викидом небезпечних хімічних речовин (НХР) характеризуються значними розмірами зони ураження, яка може досягати декількох квадратних кілометрів. Додатковим ускладненням є знаходження в зоні ураження великої кількості цивільного населення та необхідність залучення значних сил та засобів на ліквідацію наслідків такої НС [1]. Це становить значну загрозу для населення, території та навколишнього середовища, які є основними об'єктами системи цивільного захисту. З метою забезпечення екологічної безпеки в зоні атмосферного забруднення з викидом небезпечних газів та прийняття управлінського рішення по евакуації населення важливим є проведення коректного моніторингу та точного прогнозування розвитку надзвичайної ситуації [2]. Прогнозування розвитку надзвичайної ситуації є обов'язковим етапом для прийняття коректного управлінського рішення по ліквідації аварії [3]. Особливо суттєвим процес прогнозування є при виникненні НС з викидом газоподібних небезпечних хімічних речовин.

Для забезпечення достатньої точності розрахунку розмірів зон хімічного забруднення необхідне врахування значної кількості факторів, які умовно можна розподілити на два блоки – метеорологічні умови та параметри

викиду [4]. До метеорологічних умов відносяться напрямок та швидкість вітру, температура та вологість повітря, атмосферний тиск. До параметрів викиду відносяться вид хімічної речовини, її температура, густина та тиск зберігання, інтенсивність викиду [5]. Існуючі методи та засоби запобігання надзвичайним ситуаціям з викидом небезпечних речовин в атмосферному повітрі здатні впливати на зону ураження на висотах декілька метрів [6].

Найбільш вагомими науковими результатами в даній галузі отримані в роботах вітчизняних та закордонних вчених: Басманова О.Є. [7], Попов О.О. [8], Івлєв Л.С. [9], Кустов М.В. [10], Алоян А.Е. [11], Crowley J.N. [12], Rosenfeld D. [13], Shiraiwa M. [14] та ін.

Існуючі у світі підходи до ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій (НС), які характеризуються викидом в атмосферне повітря шкідливих та радіоактивних речовин, ґрунтуються на використанні рідинних завіс за допомогою наземної аварійно-рятувальної техніки. При цьому відбувається осадження шкідливих та радіоактивних речовин із атмосферного повітря дрібнодисперсним потоком води, який утворюється за допомогою засобів аварійно-рятувальної техніки. За умов присутності процесу осадження зони викиду до цих факторів додається ще один блок, який включає інтенсивність потоку рідини на осадження, площа осадження, наявність хімічної реакції рідини з небезпечною хімічною речовиною та ін. Це все суттєво ускладнює роботу служб контролю екологічної безпеки та аварійно-рятувальних підрозділів по ліквідації атмосферного забруднення.

Таким чином, розробка методик прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів є актуальною науково-практичною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано у науковому відділі з проблем цивільного захисту та техногенно-екологічної безпеки науково-дослідного центру Національного університету цивільного захисту України (м. Харків) відповідно до відповідно до Розпорядження КМУ від 27 квітня 2011 року

№ 368-р «Про схвалення Концепції Загальнодержавної цільової соціальної програми захисту населення і територій від надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру на 2012–2016 роки» та «Стратегії реформування системи Державної служби з надзвичайних ситуацій», схваленої Розпорядженням КМУ від 25 січня 2017 р. №61-р у рамках науково-дослідної роботи «Розробка методу ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій з викидом хлору» (№ ДР 0121U000007), в якій здобувач була відповідальним виконавцем.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є розробка методики прогнозування хімічної обстановки при аваріях з викидом небезпечних газів в атмосферне повітря.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні науково-технічні задачі:

1. Проаналізувати існуючі методики та принципи прогнозування та ліквідації надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних хімічних речовин;
2. Розробити математичну модель прогнозування хімічної обстановки при аваріях з викидом небезпечних газів та методику на її основі;
3. Експериментально перевірити працездатність запропонованої методики прогнозування хімічної обстановки при аваріях з викидом небезпечних газів;
4. Розробити пропозиції щодо практичної реалізації методики прогнозування хімічної обстановки при аваріях з викидом небезпечних газів.

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

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

Методи дослідження. Для розв'язання поставлених наукових завдань в дисертаційному дослідженні використовувалися методи математичного та імітаційного моделювання, методи вирішення оптимізаційних задач, методи мікроскопії дисперсних систем, фізико-хімічні методи вимірювання

метеорологічних параметрів, методи напівпровідникового детектування, методи проведення піролітичних випробувань, теорія планування експерименту, методи теорії імовірності та математичної статистики були використані під час обробки результатів експериментів та перевірки достовірності отриманих результатів.

Наукова новизна одержаних результатів. У дисертаційній роботі вирішено важливу науково-практичну задачу в галузі цивільного захисту – розроблено методика прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів в інтересах підвищення ефективності реагування на такі надзвичайні ситуації з урахуванням варіативності хімічної природи небезпечних газів та кількості сил та засобів оперативно-рятувальних служб за рахунок уточнення межі небезпечної зони хімічного забруднення та динаміки його розповсюдження.

При виконанні дисертації отримано нові наукові результати:

1. *Удосконалено* математичну модель забруднення атмосферного повітря в результаті аварійних викидів небезпечних хімічних газів, яка, на відміну від існуючих моделей, враховує процес примусового осадження газу дрібнодисперсним рідинним потоком, що дозволяє визначати розподіл концентрації забруднюючих речовин в просторі та часі як на етапі розвитку надзвичайної ситуації так і в процесі її ліквідації в залежності від: тривалості та інтенсивності викиду, швидкості та напрямку вітру, температурного градієнту з висотою, коефіцієнтів турбулентної дифузії, температури повітря, місце розташування систем аерозольного осадження, інтенсивності та дисперсності водяного струменя, швидкості осадження небезпечних газів водяним потоком.

2. *Вперше розроблено* та створено діючий зразок експериментальної установки для дослідження процесів сорбції газів, яка складається із камери осадження із газовою форсункою для подачі небезпечних газів різної інтенсивності та їх відведення, системи газоаналізаторів для контролю просторового розподілу газів, блоку управління інтенсивністю подачі рідини

на осадження та форсунок для корегування дисперсності рідинного потоку, яка реалізує можливість визначення інтенсивності осадження небезпечних газів дисперсними потоками та використання якої дозволило експериментально підтвердити адекватність розробленої математичної моделі (Патент України №150432).

3. *Вперше розроблено та програмно реалізовано* методику прогнозування хімічної обстановки при аваріях з викидом небезпечних газів, що спирається на розроблену математичну модель забруднення атмосферного повітря в результаті аварійних викидів небезпечних газів та яка, на відміну від існуючих, дозволяє збирати та аналізувати моніторингову інформацію осередку викиду та зони поширення хмари небезпечного газу, прогнозувати розміри зони хімічного забруднення з урахуванням наявних ресурсів, визначати оптимальну кількість, місця розташування та параметри водяних струменів систем аерозольного осадження для ефективної ліквідації аварій та надзвичайних ситуацій із викидом небезпечних газів.

Практичне значення отриманих результатів полягає в розробці нових підходів до ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій на хімічно небезпечних об'єктах де відбуваються викиди небезпечних газів в атмосферне повітря. Розроблена в дисертації багатокритеріальна математична модель та програмні алгоритми її розв'язання можуть бути використані як основа для побудови комплексної автоматизованої програми для прогнозування наслідків викидів небезпечних газів в атмосферу.

Розроблена методика прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів може бути використана оперативно-рятувальними службами на рівні оперативно-координаційних центрів та штабів з ліквідації надзвичайних ситуацій при організації безпечної роботи рятувальників в зоні НС та при організації евакуації населення із потенційно небезпечних зон. Департаменти та відділи цивільного захисту територіальних органів державної влади можуть використовувати запропоновану методику прогнозування з метою розробки нових та уточнення існуючих планів з

реагування на надзвичайні ситуації на хімічно небезпечних об'єктах та на територіях, що прилягають до таких об'єктів.

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

Основні результати дисертаційного дослідження були впроваджені в підрозділах Головного управління ДСНС України в Харківській та Львівській областях, а також в навчальному процесі Національного університету цивільного захисту України (м. Харків).

Особистий внесок здобувача. Основні положення та результати дисертаційного дослідження отримані автором особисто і наведені в роботах [15-31]. В наукових роботах, що опубліковані у співавторстві, особисто здобувачу належать: в роботі [15] - аналіз статистики виникнення та протікання процесу ліквідації надзвичайних ситуацій на хімічно небезпечних об'єктах, обробка та аналіз результатів експериментальних досліджень; в роботі [16] - аналітичний огляд різних підходів до прогнозування зон хімічного забруднення, формалізація задачі моделювання процесів розповсюдження газів з атмосферному повітрі з їх паралельним осадженням, визначення припущень, які використовуються в процесі моделювання, розробка керуючого алгоритму методики прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів; в роботі [17] - розробка математична модель розповсюдження небезпечного газу в атмосфері при його активному осадженні водними аерозолями, описує процес осадження газу із атмосферного повітря дрібнодисперсним рідинним потоком з різною інтенсивністю; в роботі [18] - розробка методики прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів, перевірка працездатності запропонованих математичних моделей динаміки небезпечних газів в атмосферному повітрі при їх активному осадженні; в

роботі [19] - розробка лабораторної установки для проведення експериментальних досліджень динаміки розповсюдження небезпечних газів під впливом дисперсних потоків та імітації повітря, проведення експериментальних досліджень та перевірка достовірності та ефективності методики прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів; в роботі [20] - теоретичне моделювання та інтерпретація експериментальних результатів щодо перевірки сорбційних процесів небезпечних газів дисперсними потоками в атмосфері; в роботі [21] - розробка методу розв'язання моделей прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів з використанням методу просторового розміщення вузлових точок, які задовольняють умові Куранта-Фрідрікса-Леві, порівняльний аналіз ефективності різних методик прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій; в роботі [22] - формалізована постановка задачі та визначення можливих припущень для моделювання процесу розповсюдження хмари небезпечної хімічної речовини; [23] – перевірка працездатності розроблених математичних моделей на прикладі реальних аварій на хімічно небезпечних об'єктах; в роботі [24] - збір та аналіз статистичних даних щодо надзвичайних ситуацій на хімічно небезпечних об'єктах, визначення домінуючих причин виникнення таких надзвичайних ситуацій та характерних рис їх розвитку; в роботі [25] - розв'язання рівняння розповсюдження небезпечних хімічних речовин в атмосферному повітрі у присутності дисперсних струменів для його осадження; в роботі [26] -- опис процесу хімічної нейтралізації слаботорзчинних у воді небезпечних газів, розрахунок оптимальної концентрації нейтралізуючих речовин у водному розчині; в роботі [27] – збір та аналіз надзвичайних ситуацій на об'єктах зберігання хлору, визначення основних причин виникнення аварійних ситуацій та характерних властивостей надзвичайних ситуацій із викидом небезпечних речовин в атмосферне повітря; в роботі [28] - розробка програмного алгоритму для розрахунку розподілу концентрації небезпечних газів в атмосфері за допомогою розробленої системи математичних рівнянь;

в роботі [29] – розробка алгоритму локалізації аварії з викидом небезпечного газу; в роботі [30] - розробка конструкції експериментальної лабораторної камери для дослідження динаміки розповсюдження небезпечних газів у повітряному потоці із паралельним осадженням дисперсними струменями; в роботі [31] – розробка конструкції лабораторної установки та розрахунок типорозмірів форсунок розпилення.

Апробація результатів дисертаційного дослідження. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на: 11-й Міжнародній науково-практичній конференції «Eurasian scientific congress» (м. Барселона, Іспанія, 3 листопада 2020 р., форма участі – заочна); Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту» (НУЦЗУ, м. Харків, 27 лютого 2020 р., форма участі – очна); Міжнародній науково-практичній конференції молодих учених «Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту» (НУЦЗУ, м. Харків, 16 квітня 2021 р., форма участі – очна); Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми надзвичайних ситуацій» (НУЦЗУ, м. Харків, 20 травня 2021 р., форма участі – очна); Круглому столі «Суб’єкти забезпечення цивільного захисту (регіонального та місцевого рівня) в реалізації завдань із запобігання та ліквідації наслідків НС» (НУЦЗУ, м. Харків, 26 лютого 2021 р., форма участі – очна); Круглому столі (вебінарі) «Запобігання надзвичайним ситуаціям та їх ліквідація» (НУЦЗУ, м. Харків, 23 лютого 2022 р., форма участі – очна); XVII Міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених, курсантів та студентів «Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності» (ЛДУБЖД, м. Львів, 04 березня 2022 р., форма участі – заочна); XIII Міжнародній науково-методичній конференції Європейської Асоціації наук з безпеки (EAS) «Безпека людини у сучасних умовах» (НТУ "ХПІ", м. Харків, 03 грудня 2021 р., форма участі – заочна).

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 17 наукових праць: 4 статті у наукових фахових виданнях України що входять

до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Academic Research Index – ResearchBib, Ulrich’s Periodicals Directory, Root Indexing, Ulrich Web, Cite Facto (з них 1 стаття – у виданні, яке входить до міжнародної наукометричної бази Scopus); 3 статті – у наукових періодичних виданнях інших держав з напрямку, з якого підготовлено дисертацію, які входить до міжнародної наукометричної бази Scopus; 9 тез доповідей на конференціях та 1 патент на корисну модель.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота загальним об'ємом 212 сторінок складається з анотації, змісту, переліку умовних позначень, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел зі 146 найменувань і 3 додатків, містить 30 рисунків та 7 таблиць.

РОЗДІЛ 1.

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДИК ТА ПРИНЦИПІВ ПРОГНОЗУВАННЯ ТА ЛІКВІДАЦІЇ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ З ВИКИДОМ НЕБЕЗПЕЧНИХ ХІМІЧНИХ РЕЧОВИН

В даному розділі проаналізовано нормативну базу України та закордонних держав щодо реагування та ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій на хімічно небезпечних об'єктах. Визначено можливі класи аварій з викидом небезпечних речовин в атмосферне повітря та розглянуто основи розробки нових методів ліквідації надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних хімічних речовин.

Проведено аналіз особливостей виникнення та розвитку надзвичайних ситуацій на хімічно небезпечних об'єктах. Систематизовано статистичні данні щодо аварій на хімічно небезпечних об'єктах, як в Україні так і в світі. Визначено специфічні особливості організації процесу ліквідації надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних хімічних речовин.

Розглянуто існуючі методики прогнозування наслідків хімічних викидів при надзвичайних ситуаціях, які застосовуються в Україні та інших розвинених країнах світу. Проаналізовано основні математичні моделі та алгоритми на яких засновані ці методики та визначені їх переваги та недоліки.

Матеріали розділу викладено в роботах автора [15, 16 ,22, 24, 27].

1.1. Аналіз нормативної бази України щодо ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних хімічних речовин

1.1.1. Класифікації надзвичайних ситуацій техногенного характеру з викидом небезпечних хімічних речовин

Сучасний стан промисловості вимагає використання великої кількості різноманітних хімічних речовин. Навіть за умов нормальної роботи

промислових підприємств у навколишнє середовище викидається велика кількість небезпечних хімічних речовин. Основними об'єктами навколишнього середовища на які чинять негативний вплив небезпечні речовини є повітря, вода та ґрунт. Особливо масштабні викиди відбуваються у разі виникнення на таких об'єктах масштабних аварій. Незважаючи на значні зусилля по дотриманню правил безпечної експлуатації на об'єктах та підприємствах, де виготовляються, зберігаються та використовуються небезпечні хімічні речовини виникають аварійні ситуації. Надзвичайні ситуації (НС) з викидом небезпечних хімічних речовин (НХР) характеризуються значними розмірами зони ураження, яка може досягати декількох квадратних кілометрів.

З метою створення єдиної системи класифікації надзвичайних ситуацій та визначення їх рівнів, забезпечення оперативного і адекватного реагування на такі ситуації Кабінетом Міністрів України затверджено порядок класифікації надзвичайних ситуацій за їх рівнями [32].

Метою класифікації НС є створення ефективного механізму оцінки події, що стала або може статися у прогнозований термін, та визначення ступеня реагування на відповідному рівні управління.

Класифікація надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру за їх рівнями здійснюється для забезпечення організації взаємодії центральних і місцевих органів виконавчої влади, підприємств, установ та організацій у процесі вирішення питань, пов'язаних з надзвичайними ситуаціями та ліквідацією їх наслідків [15].

Залежно від обсягів заподіяних наслідків, технічних і матеріальних ресурсів, необхідних для їх ліквідації, надзвичайна ситуація класифікується як державного, регіонального, місцевого або об'єктового рівня.

Для визначення рівня надзвичайної ситуації встановлюються такі критерії:

- 1) територіальне поширення та обсяги технічних і матеріальних ресурсів, що необхідні для ліквідації наслідків надзвичайної ситуації;

2) кількість людей, які постраждали або умови життєдіяльності яких було порушено внаслідок надзвичайної ситуації;

3) розмір заподіяних (очікуваних) збитків.

Найбільшим за масштабами класом є НС загальнодержавного рівня. До таких НС відносять небезпечні події які розвиваються на територіях двох та більше областей або їх наслідки можуть загрожувати територіям сусідніх держав. Також до НС загальнодержавного рівня відносяться НС невеликого територіального масштабу але які потребують значних сил та засобів для ліквідації, існує необхідність залучення додаткових ресурсів із інших областей або загальнодержавних резервів. Додатковим параметром визначення категорії НС є розміри збитків або кількість постраждалих. При перевищенні деяких порогових параметрів за збитками навіть умовно невеликі аварії відносять до НС загальнодержавного рівня.

Ознаки для НС регіонального та місцевого рівнів аналогічні але зменшені до розмірів відповідних адміністративно-територіальних одиниць. Тобто НС регіонального рівня не повинні виходити за межі окремого регіону, а НС місцевого рівня відбуваються в межах одного населеного пункту та на ліквідацію потребують сили та засоби. Які може забезпечити відповідна територіальна громада [16].

НС об'єктового рівня це найменші аварії, зона ураження яких не виходить за межі окремого об'єкта та не призводить до значних збитків.

Особливістю надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних хімічних речовин в атмосферу є швидке поширення зони ураження на значну територію, тому більшість таких НС відноситься саме до НС місцевого та регіонального рівнів.

Попередня оцінка події, що сталася або може статися, і визначення її як надзвичайної ситуації здійснюється оперативним черговим персоналом об'єкта, місцевого органу виконавчої влади чи органу місцевого самоврядування, виходячи з первинної інформації та керуючись відповідними інструкціями [32].

З метою вибору методу локалізації та ліквідації надзвичайної ситуації суттєвим є визначення характеру виникнення надзвичайної ситуації. Відповідно до причин виникнення НС поділяються на:

НС техногенного характеру – це пожежі на транспорті, промислових об'єктах та у будинках житлового фонду, аварії з викидом небезпечних хімічних, радіоактивних та біологічних речовин, аварії на об'єктах життєзабезпечення;

НС природного характеру – аварії, що виникли по причині геологічних, метеорологічних, гідрологічних явищ. До таких аварій також відносяться природні пожежі, зміна стану повітряного басейну, інфекції людей, сільськогосподарських тварин, рослин хворобами чи шкідниками, зміна стану водних ресурсів;

НС соціально-політичного характеру, пов'язані із різними протиправними діями масового характеру, терористичні акти, що призводять до викиду небезпечних речовин, масові заворушення та захоплення заручників;

НС воєнного характеру, пов'язані з наслідками застосування зброї масового ураження або звичайних засобів ураження, під час яких виникають вторинні фактори ураження населення внаслідок зруйнування атомних і гідроелектричних станцій, складів і сховищ радіоактивних і токсичних речовин та відходів [32].

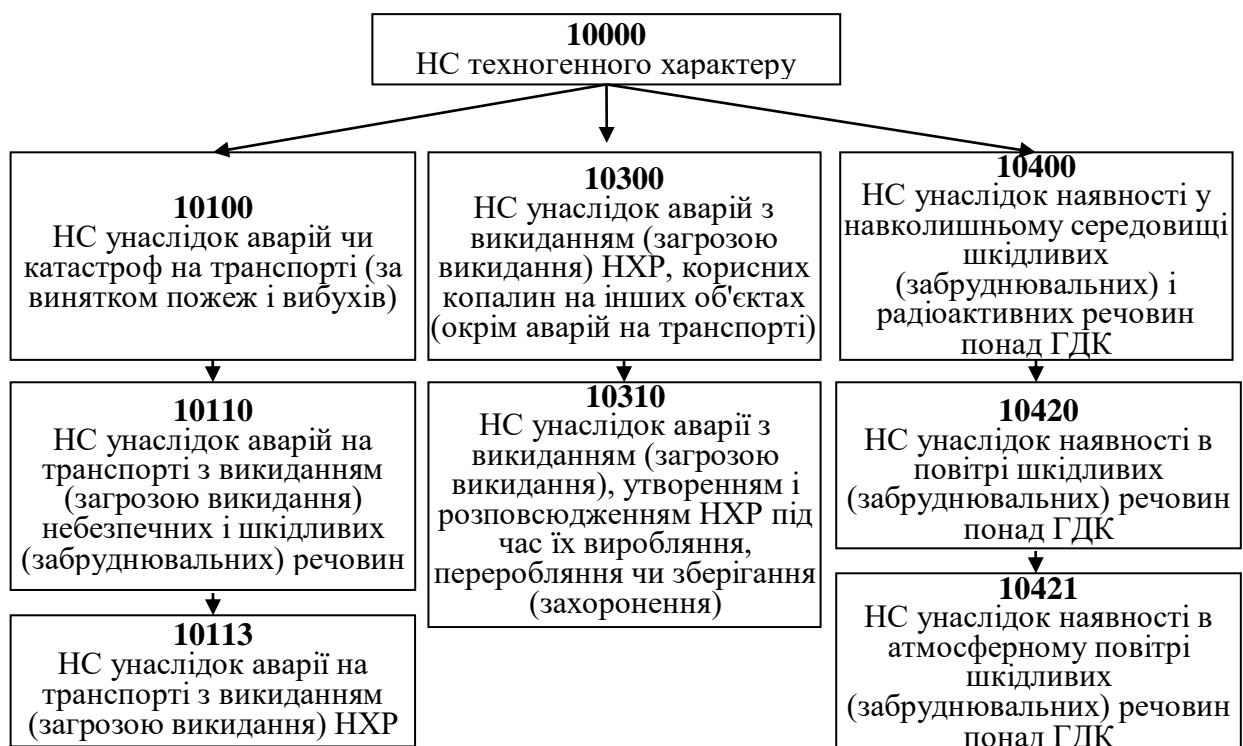
Рішення комісій з питань техногенно-екологічної безпеки і надзвичайних ситуацій щодо класифікації надзвичайної ситуації за рівнем або рішення ДСНС є підставою для здійснення інших заходів щодо реагування на надзвичайну ситуацію відповідно до законодавства.

Однак ця класифікація є дуже узагальненою та широкою, разом з цим різноманіття можливих надзвичайних ситуацій призводить до того, що навіть в межах одного класу НС можуть застосовуватись суттєво різні методи та способи ліквідації надзвичайних ситуацій. З метою більш детальної класифікації НС та узгодження різних станів із існуючим законодавством

Державний комітет України з питань техногенного регулювання та споживчої політики прийнято Національний класифікатор України [33], складовою частиною цього класифікатору є Класифікатор надзвичайних ситуацій (КНС) ДК 019:2010 - один зі складників комплексу національних класифікаторів [34]. Він містить перелік НС, визначених у відповідних нормативно-правових актах і згрупованих за ознаками належності до відповідних НС, які можуть виникнути на окремій території України чи об'єкті в різних галузях національного господарства країни.

Ієрархічний метод класифікації дозволяє використовувати числові коди для опису повної гілки природи виникнення надзвичайної ситуації.

Класифікаційні гілки з відповідними кодами для можливих видів надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних хімічних речовин в атмосферу приведені нижче [22].



Національний класифікатор [34] застосовують для збирання адміністративних даних та організації взаємодії органів центральної

виконавчої влади, відомств, організацій, підприємств під час вирішування питань, пов'язаних із надзвичайними ситуаціями

1.1.2. Правові основи організації ліквідації надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних хімічних речовин в Україні

Ліквідація аварій на хімічно небезпечних об'єктах (ХНО) повинна включати в себе обов'язкові етапи кризового контуру управління – моніторинг, прогнозування, прийняття управлінського рішення та безпосередній вплив на аварію [35]. При цьому на правильність прийнятого управлінського рішення безпосередньо впливає точність прогнозування розвитку НС [36].

Прогнозування розвитку надзвичайної ситуації є обов'язковим етапом для прийняття коректного управлінського рішення по ліквідації аварії [37]. Особливо суттєвим процес прогнозування є при виникненні НС з викидом газоподібних небезпечних хімічних речовин. Однак процедура прогнозування залежить від характеру надзвичайної ситуації та не може використовувати загальні моделі.

Одним з основних принципів забезпечення цивільного захисту, згідно Кодексу цивільного захисту України (Розділ I – Загальна частина, Глава 1 – Загальні положення, Стаття 7 – Основні принципи здійснення цивільного захисту), є комплексність підходу до вирішення завдань цивільного захисту [38]. Вище розглядалось, що підсистема моніторингу в Україні розроблена достатньо добре, на відмінну від інших складових.

Створення єдиної системи моніторингу надзвичайних ситуацій в Україні тільки починається [24, 39], тому правові основи проведення моніторингу надзвичайних ситуацій також не об'єднані в єдину правову базу [40, 41].

Відповідно до Статті 43 «Моніторинг і прогнозування надзвичайних ситуацій» Кодексу цивільного захисту України, з метою забезпечення

здійснення заходів із запобігання виникненню надзвичайних ситуацій забезпечується постійне проведення моніторингу і прогнозування надзвичайних ситуацій. Спостереження, лабораторний та інший контроль включають збирання, опрацювання і передавання інформації про стан навколишнього природного середовища, забруднення продуктів харчування, продовольчої сировини, фуражу, води радіоактивними та хімічними речовинами, зараження збудниками інфекційних хвороб та іншими небезпечними біологічними агентами.

З метою моніторингу та прогнозування надзвичайних ситуацій в Україні створюється та функціонує система моніторингу та прогнозування надзвичайних ситуацій. Кабмін визначає порядок функціонування системи моніторингу та прогнозування надзвичайних ситуацій, моніторингу та прогнозування надзвичайних ситуацій, перелік установ та організацій, що належать до суб'єктів моніторингу, контролю, лабораторного моніторингу та прогнозування надзвичайних ситуацій [27]. Україна. Кабмін, відповідні місцеві державні адміністрації, органи місцевого самоврядування, суб'єкти господарювання [41] визначають тематику моніторингу, моніторингу, лабораторного контролю та прогнозування надзвичайних ситуацій на регіональному, місцевому та об'єктовому рівнях.

У структурі Державної служби України з надзвичайних ситуацій завдання моніторингу надзвичайних ситуацій покладено на Гідрометеорологічний департамент України. Цей офіс відповідно до свого функціонального призначення контролює діяльність державної системи гідрометеорологічного моніторингу, прогнозування та забезпечення гідрометеорології, моніторингу навколишнього природного середовища, зокрема проведення гідрометеорологічних досліджень, ведення інформаційної бази гідрометеорологічних даних та даних про стан природного середовища, радіаційний фон та основні спостереження за станом забруднення навколишнього середовища, державний облік, сонячно-фізичний моніторинг, облік та зберігання матеріалів гідрометеорологічного

моніторингу. Завданням Гідромету України є також прогнозування погоди, гідрологічної системи водних об'єктів, небезпечних і стихійних гідрометеорологічних явищ, урожайності сільськогосподарських культур та надання інформації про фактичні та очікувані зміни гідрометеорологічних умов і стану довкілля, попередження про небезпечні та стихійні гідрометеорологічні явища, а також здійснення гідрометеорологічного обслуговування суб'єктів господарювання незалежно від форм власності. До компетенції гідрометеорологічного відділу відноситься також організація заходів щодо моніторингу забруднення навколишнього природного середовища на пунктах державної системи гідрометеорологічного спостереження; контроль вмісту забруднюючих речовин і радіонуклідів в атмосферному повітрі; гідрохімічні показники резервуарів; аналіз ґрунту та опадів [42, 43].

Загалом функції цього офісу полягають лише у забезпеченні екологічного моніторингу. Водночас завдання моніторингу стану навколишнього природного середовища та рівня його забруднення, відповідно до Закону України «Про охорону навколишнього природного середовища» (розділ V - Моніторинг, прогнозування, облік та інформація у сфері навколишнього природного середовища, Стаття 22 - Екологічний моніторинг) [41], покладається на Державну систему моніторингу навколишнього природного середовища та довкілля (ДСМД). Основні принципи роботи ДСМД визначені постановою Кабінету Міністрів України від 30 березня 1998 р. № 391 [40]. Метою створення ДСМД є проведення систематичних спостережень, збір, обробка, передача, збереження та аналіз інформації про стан навколишнього природного середовища, прогнозування його змін та розробка науково обґрунтованих рекомендацій для прийняття рішень щодо запобігання негативним змінам стану навколишнього природного середовища. та дотримання вимог цивільної безпеки.

Пріоритетами роботи цієї системи є захист життєво важливих інтересів людини і суспільства; збереження природних екосистем; запобігання

кризовим змінам стану довкілля та запобігання виникненню надзвичайних ситуацій.

ДСМД здійснюється на трьох рівнях, які поділяються відповідно до регіональних особливостей – національному, регіональному та місцевому.

Виконання функцій ДСМД покладається на: Міністерство аграрної політики та продовольства України; Мінекології та природних ресурсів України; Державне агентство України з управління зоною обмеженого доступу; Державна служба геології та надр України; Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України; Українське державне космічне агентство; Державна служба України з надзвичайних ситуацій; Державна санітарно-епідеміологічна служба України; Державне агентство лісових ресурсів України; Державне агентство водних ресурсів України; Державне агентство земельних ресурсів України та інші центральні органи виконавчої влади, на які покладено екологічний контроль, а також підприємства та організації, дії яких можуть призвести до забруднення навколишнього природного середовища.

Для координації дій ДСМД створено Міжвідомчу комісію з моніторингу довкілля [44].

Моніторинг потенційно небезпечних об'єктів (ПНО) здійснюється на підставі наказу МНС України від 6 листопада 2003 р. № 425 «Про затвердження Положення про моніторинг потенційно небезпечних об'єктів» [45]. Положення визначає основні завдання суб'єктів моніторингу ПНО та порядок проведення моніторингу. При цьому відповідальні особи ПНО забезпечують проведення систематичних спостережень за критеріями стану ПНО та надають відповідним уповноваженим органам з питань надзвичайних ситуацій та ЦЗН інформацію про стан ПНО. Інформація надається у формі електронного документа відповідно до закону або на паперовому носії в установленому порядку. Передача інформації здійснюється за допомогою комп'ютерної системи зв'язку та наявних технічних засобів зв'язку з районом, областю чи містом, а також у формі

письмових повідомлень. Інформація конфіденційного характеру надається виключно захищеними засобами зв'язку або у формі листів, складених у встановленому порядку. Внесення до відповідної бази даних підсистеми моніторингу ПНО та обробка інформації здійснюється спеціалістами органу, уповноваженого з питань НС та ЦЗН. Уповноважені органи з питань НС та ЦЗН здійснюють контроль за достовірністю даних інформації, отриманої від відповідальних осіб ПНО, та попередню оцінку змін у стані ПНО. Про зміни в статусі ПНО, які можуть спричинити виникнення надзвичайної ситуації місцевого чи регіонального рівня, органи, уповноважені з питань надзвичайних ситуацій, та ЦЗН у встановленому порядку повідомляють відповідні місцеві органи виконавчої влади для прийняття управлінських рішень. У разі, якщо зміни стану ДСНС можуть призвести до НС регіонального чи державного рівня, інформація про них невідкладно подається до ДСНС України. Уповноважені органи з питань надзвичайних ситуацій та ЦЗН своєчасно передають інформацію про результати моніторингу керівництву Страхового фонду документації.

Аналізуючи систему моніторингу надзвичайних ситуацій, необхідно відзначити наступні недоліки: неповна відповідність нормативно-правового забезпечення системи моніторингу сучасним вимогам; відсутність єдиної мережі нот; застарілі матеріали та технічне обладнання; Відсутність необхідного технічного оснащення в більшості регіонів України.

При комплексному підході до питання забезпечення цивільного захисту держави в надзвичайних ситуаціях необхідно усунути або зменшити вплив небезпечних факторів, що виникли внаслідок надзвичайної ситуації (розділ VI - Реагування на надзвичайні ситуації та ліквідація їх наслідків, Глава 16 – Ліквідація наслідків надзвичайних ситуацій, Стаття 79 – Порядок проведення аварійно-рятувальних та інших невідкладних робіт) [41]. Водночас Розділ IV - Захист населення і територій від надзвичайних ситуацій, Глава 8 - Інженерний захист території, захист від радіації та хімічних речовин, стаття 35 - Радіаційний захист та хімічний захист

населення і території Кодексу Цивільного захисту України не передбачає ефективних заходів щодо зменшення повітряного простору зони ураження, що є серйозним дефектом і суперечить загальним положенням (стаття 4 – Цивільний захист, стаття 7 – Основні принципи здійснення цивільного захисту) той же закон [41].

Прогнозування й оцінювання хімічної обстановки передбачає визначення розмірів зони ураження та розташування її границь, прогнозування можливості ураження людей що знаходяться в осередку ураження, визначення часу підходу зараженого повітря до об'єкта.

Зона атмосферного забруднення небезпечними газами у надзвичайних ситуаціях та умови забезпечення безпеки визначаються відповідно до норм гранично допустимих концентрацій шкідливих речовин, регламентованих Законом України «Про охорону атмосферного повітря» від 16.10.92 р. [46]. Цим Законом (стаття 16 - Регулювання діяльності, що впливає на погоду та клімат) встановлено необхідність отримання дозволу на штучне утворення опадів. Це відноситься до компетенції центральних органів виконавчої влади, що забезпечують реалізацію державної політики у сфері охорони навколишнього природного середовища, за погодженням з центральним органом виконавчої влади, що реалізує державну політику у сфері санітарно-епідеміологічного обслуговування населення, місцевими органами виконавчої влади та органи місцевого самоврядування [47].

Аналіз законодавчої системи України у сфері аварійної ліквідації хімічно небезпечних об'єктів показує, що прийняті в державі законодавчі та нормативні акти ґрунтуються на основних міжнародних нормах Всесвітньої метеорологічної організації ООН, Конвенції про транскордонну авіацію та забруднення навколишнього середовища (Женева, 1979 р.), угоди про негайне повідомлення про ядерну аварію (Відень, 1986 р.), Віденська конвенція про охорону озонового шару (1985 р.), Рамкова конвенція ООН про зміну клімату (Ріо-де-Жанейро, 1992 р.) , Конвенція про оцінку впливу

на навколишнє середовище в транскордонному контексті (ЕКСПО, 1999) [48-52].

Таким чином, встановлено, що надзвичайні ситуації з викидом небезпечних речовин в атмосферу за національним класифікатором відносяться до трьох підкласів НС техногенного характеру - НС унаслідок аварій чи катастроф на транспорті; НС з викидом НХР та НС унаслідок наявності у навколишньому середовищі шкідливих речовин понад ГДК. Визначено, що правові основи для створення системи ліквідації надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних речовин на хімічно небезпечних об'єктах закріплені в законах та інших підзаконних актах, які ґрунтуються на міжнародній правовій базі.

1.2. Аналіз особливостей розвитку та ліквідації надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних хімічних речовин

1.2.1. Аналіз джерел небезпеки при надзвичайних ситуаціях з викидом небезпечних хімічних речовин

Кожен рік в світі трапляється більше 20 аварій на хімічно небезпечних підприємствах [53]. Аналіз основних причин аварій, що сталися на хімічно-небезпечних об'єктах, показав, що найсуттєвішою причиною аварій залишається людський фактор, а саме помилка персоналу. Однак поряд з цим вагомою причиною виникнення надзвичайних ситуацій на хімічно небезпечних об'єктах є розгерметизація різних ємностей для зберігання хімічно небезпечних речовин [54]. Такі аварії призводять до великих розмірів зони уражень і, як наслідок, значних людських жертв [55]. При цьому в роботі [56] показано, що в промислово розвинених країнах розміщено декілька сотень підприємств, на яких обертаються хімічно небезпечні речовини. Не зважаючи на те, що розвиваються технології збільшення екологічної безпеки на таких підприємствах [57], у разі виникнення аварій на них може статися викид небезпечних хімічних речовин. Загальна кількість

хімічно небезпечних речовин на цих підприємствах – більше 283 тис. тонн, більшу частину з яких становлять аміак, хлор та сірчана кислота [58]. Крім того, аміак та хлор за нормальних умов перебувають у газоподібному стані та легко поширюються в атмосфері [59]. Але залишилися невирішеними питання, пов'язані із забезпеченням безпеки на підприємствах де обертаються ХНР.

В Україні також існує високий рівень ризику виникнення надзвичайних ситуацій (НС), пов'язаних із аваріями з викидом або загрозою викиду небезпечних хімічних речовин. Він пов'язаний з функціонуванням 711 об'єктів, на яких зберігається або використовується у виробничій діяльності більше 285 тис. т небезпечних хімічних речовин, у тому числі: більше 3 тис. т хлору, 183 тис. т аміаку та близько 99 тис. т інших небезпечних хімікалій [15].

Особливостями аварії на хімічно небезпечних об'єктах є потужні вражаючі фактори й більша швидкість розвитку зони поразки небезпечної хімічної речовини (НХР), що вимагає проведення швидкої евакуації (виводу) працівників, службовців, населення міста, де відбулася аварія. Найбільш достовірною причиною аварії є зношеність устаткування, несвоєчасність контрольно – профілактичних заходів, порушення технології, правил техніки безпеки, правил перевезення НХР і таке інше. Виходячи з цього актуальною проблемою, що вимагає рішення з удосконалення систем та методів попередження та ліквідації аварій з викидом хлору [16].

Серед об'єктів, які зберігають або використовують у своїй діяльності хімічні речовини, найбільш потенційно небезпечними є:

виробництва вибухових речовин та утилізації непридатних боєприпасів;

великотоннажні виробництва неорганічних речовин (мінеральні добрива, хлор, аміак, кислоти);

виробництва продуктів органічного синтезу;

виробництва, що використовують хлор та аміак;

склади і бази із запасами отрутохімікатів для сільського господарства; магістральний аміако та етиленопровід [60]. Всі ці об'єкти відносяться до об'єктів підвищеної небезпеки.

За останні п'ять років в світі сталося більше 100 аварій на хімічно небезпечних підприємствах [61]. Аналіз основних причин аварій, що сталися на хімічно-небезпечних об'єктах (ХНО), дозволив виділити наступні взаємопов'язані групи НС, викликані: - відмовами (неполадками) обладнання (21%); - помилковими діями персоналу (38%); - зовнішніми впливами природного і техногенного характеру (4%). - розгерметизація (розрив) сховища (37%) (Рис. 1.1) [16].

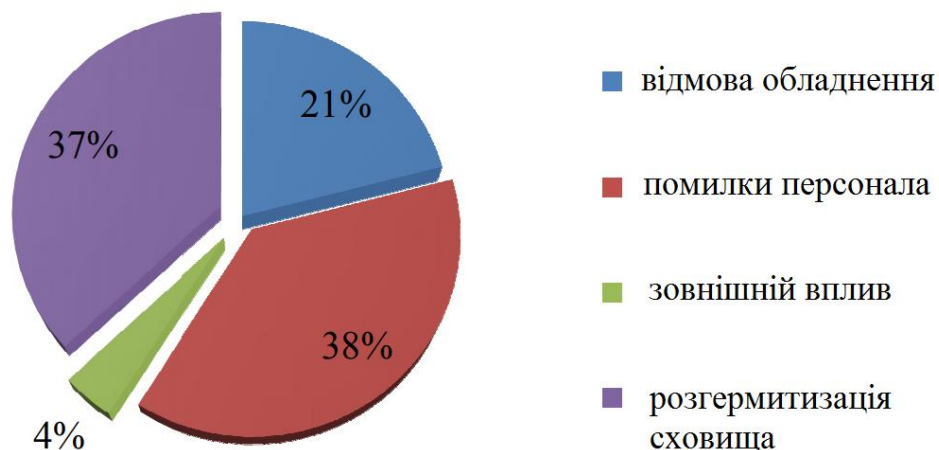


Рис.1.1. Характер аварій на хімічних небезпечні підприємства.

Аналіз Рис. 1.1 показав, що найсуттєвішою причиною аварій залишається людський фактор, а саме помилка персоналу. Однак поряд з цим вагомою причиною виникнення надзвичайних ситуацій на хімічно небезпечних об'єктах є розгерметизація різних ємностей для зберігання хімічно небезпечних речовин [62], що призводить до великих розмірів зони уражень і, як наслідок, значних людських жертв.

Всього за останні сто років виникло більше 70 масштабних аварій з викидом хімічно небезпечно речовин. Результати аналізу проведеного нами таких аварій по рокам представлені на рис. 1.2.

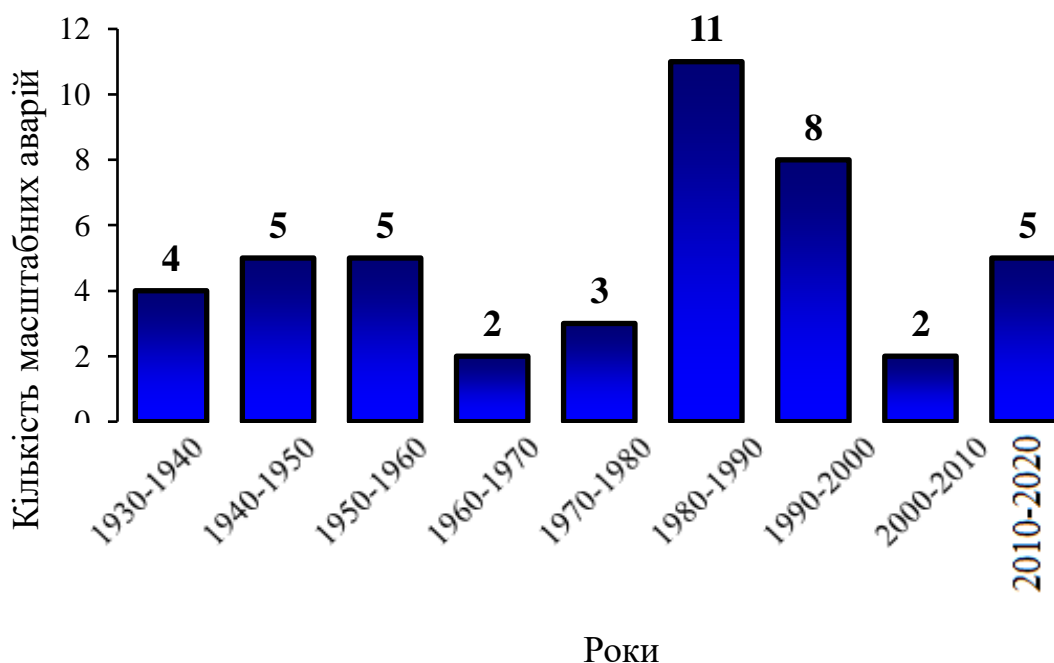


Рис. 1.2. Аварії, пов'язані з хімічними речовинами за 1930-2020 роки.

Аналіз рис. 1.2 показав, що за останні сто років найбільша кількість аварій було у 1980-1990 роках. Це пояснюється швидким зростанням хімічної промисловості у світі, при цьому розробка нових ефективних заходів безпеки не встигала за темпом індустріалізації, в ці же роки спостерігається найбільша кількість загиблих при аваріях на хімічно небезпечних об'єктах [63].

Лише при одній аварії Бхопал загинуло близько 3000 осіб. Також аналіз показав, що активна розробка нових ефективних заходів контролю та безпеки призвели до зниженню кількості масштабів на ХНО. Так наприклад на всіх аварій з викидом небезпечно хімічних речовин за останні 15 років загинуло менше 40 осіб.

При аварії з викидом хлору на хімічному заводі у м. Чунцін (Китай) в квітні 2004 року викликала потребу у проведенні термінової евакуації 200 тис. осіб. Значні екологічні наслідки викликала аварія на хімічному комбінаті «Солана - Нератовіце» (Чехія), внаслідок якої у водоймище потрапило 80 тонн хлору, 30 тонн мазуту, 13 тис. літрів інших нафтопродуктів, 10 тонн сірчаної кислоти, а в повітря було викинуто 100 кг хлору, 71 т вуглекислоти, і 40 т етилену. Тільки вчасно проведені аварійно-рятувальні роботи дозволили зберегти життя багатьом тисячам людей, проте 19 рятувальників загинули .

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 [64].

3 вересня 2018 року, у селі Радужне, що поблизу Кривого Рогу, стався масштабний витік хлору на одному з підприємств. Під час переливання рідкого хлору з танку місткістю 96 куб. м в транспортівочну місткість об'ємом 0,8 куб. м на засувці між танком та місткістю не витримав ущільнювач, що спричинило витік 25-30 кг хлору. В результаті аварії утворилась хмара газоподібного хлору, люди відчули ознаки отруєння хлором – першіння в горлі та запаморочення [62], що свідчить про низько ефективність існуючих систем безпеки.

Аналіз аварій з викидом аміаку приведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1. – Перелік найбільш масштабних аварій з викидом аміаку у світі та в Україні

Місце виникнення	Рік	Опис аварії
Країни Європейського Союзу		
Франція	жовтень 1986 року	На м'ясокомбінаті відбувся витік аміаку з холодильної установки. Розгерметизація

		трапилася в компресорному приміщенні і хмара речовини через вентиляційні отвори швидко розповсюдилася в навколишнє середовище. Адміністрацію та персонал об'єкту було евакуйовано, але при ліквідації надзвичайної ситуації загинув один пожежний
Німеччина	квітень 1989 року	Під час планового технічного обслуговування холодильного агрегату відбулась розгерметизація. Витік аміаку був виявлений на фланці після відкриття клапана зі сторони повітроохолоджувача. Операторам, що проводили технічне обслуговування не вдалося самостійно ліквідувати витік через низьку видимість. Функціонування заводу було зупинено, а персонал терміново евакуйовано
Уельс, Великобританія	29 квітня 1999 року	Приблизно 400 кг аміаку вилилося з блоку охолодження холодильної установки. Речовина потрапила до місцевої річки. В результаті надзвичайної ситуації загинуло понад 55% річкової фауни. Аварія показала недосконалість проектування тогочасних планів дренажу, а також слабку обізнаність операторів установки, щодо потенційних ризиків для навколишнього середовища
Сполучені Штати Америки		
Медісон, США	15 серпня 1982 року	Витік аміаку з холодильного агрегату оптового продовольчого складу. Хмара поширилась на декілька кварталів перш, ніж пожежним вдалося зупинити витік, майже через три години після його початку. Два пожежних були госпіталізовані
Х'юстон, США	грудень 1983 року	Вибух на фабриці морозива. Один працівник фабрики загинув, декілька пожежних травмовано. Вибух стався через загоряння хмари газоподібного аміаку, який вийшов в результаті розгерметизації повітроохолоджувача в холодильній камері
Альбукерке, США	1984 рік	В результаті вибуху в холодній камері загинув пожежний, інший важко поранений. Встановлено, що причиною вибуху було накопичення небезпечної концентрації аміаку
Клінтон,	8 липня	Відмова кутового шва компресора аміачної

США	1985 року	холодильної установки призвела до виходу значної кількості газоподібного аміаку в приміщення компресорної, після чого відбувся вибух. Ймовірним джерелом запалювання був один з рушійних компресорних електродвигунів. В результаті вибуху травмовано 8 осіб та нанесено значних ушкоджень промисловим будівлям
Денвер, США	1992 рік	Розрив аміакопроводу холодильної установки м'ясокомбінату. Після виявлення витіку персонал було евакуйовано, але через короткий час стався вибух, який викликав великі ушкодження будівель
Буневіль, США	24 березня 2008 року	Вибух на м'ясопереробному заводі Cargill Meat Solutions через витік аміаку став причиною евакуації 180 місцевих жителів. Після вибуху на заводі зайнялася ємність, в якій знаходилося близько 40 тонн безводного аміаку. Пожежні прийняли рішення не гасити вогонь, а дочекатися, коли ємність повністю вигорить. В результаті аварії ніхто не постраждав
Україна		
м. Горлівка, Донецька обл.	6 серпня 2013 року	На заводі ПАТ «Концерн Стирол», який розташовано в місті Горлівка Донецької області, під час капітального ремонту заводу № 1 на міжцеховому аміачному колекторі сталася розгерметизація трубопроводу рідкого аміаку діаметром 150 мм і робочим тиском 12 атмосфер, і стався викид газу аміаку, а над заводом з'явилась біла хмара, яка швидко поширювалась. На момент аварії в цеху перебувало близько 100 осіб. Внаслідок аварії в повітря потрапило 600 кг аміаку. У результаті аварії шість осіб загинуло та постраждало 26 осіб, які звернулись за медичною допомогою, 25 із них було госпіталізовано
м. Суми	18 жовтня 2017 року	Витік аміаку трапився при заправці машини для його перевезення поблизу заводу "Центролит" по вулиці Курській. Назовні потрапило від 4 до 5 тонн хімічної речовини. Було задіяно п'ять одиниць техніки та 15 чоловік особового складу, а також рятувальники ПАТ "Сумихімпром", бригада

		екстреної медичної допомоги. Рятувальники влаштували водяну завісу, яка локалізувала пари аміаку і запобігла їх розповсюдженню
Хмельницька обл.	30 липня 2018 року	на території фермерського господарства поблизу міста. Арматура однієї із цистерн, в якій було близько п'яти тон аміаку, вийшла з ладу. В результаті відбувся витік небезпечної хімічної речовини. На місце викликали рятувальників. Вони перекачали залишки аміаку в іншу цистерну, щоб запобігти подальшому витіканню

В Україні за ступенем хімічної небезпеки об'єкти розподіляються таким чином: високий рівень хімічної небезпеки спостерігається в Дніпропетровській та Донецькій областях, підвищений рівень у Луганській, Харківській, Одеській та Запорізькій областях, середній – у Черкаській, Сумській, Івано-Франківській, Полтавській областях та м. Київ, низький рівень – у 5 регіонах (Тернопільська, Хмельницька, Чернівецька, Закарпатська, Волинська області). Решта регіонів має помірний рівень небезпеки. Всього в зону можливого хімічного забруднення повністю або частково потрапляє 308 адміністративно-територіальних одиниць, в яких мешкає понад 7 млн осіб (18% від усього населення України) [61].

Незважаючи на певний прогрес, досягнутий в останні роки на хімічному виробництві, хімічно небезпечні об'єкти залишаються одними з найбільш небезпечних об'єктів.

1.2.2. Особливості організації процесу ліквідації надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних хімічних речовин

Надзвичайні ситуації з викидом небезпечних хімічних речовин характеризуються значними розмірами зони ураження, яка може досягати декількох квадратних кілометрів, знаходженням в зоні ураження великої

кількості цивільного населення, складністю локалізації аварії та необхідністю залучення значних сил та засобів на ліквідацію наслідків такої НС.

Необхідність створення системи ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій для атмосфери закладено в самому визначенні терміна «цивільний захист». Згідно Статті 4 Кодексу цивільного захисту України [40], Цивільний захист – це функція держави, спрямована на захист населення, територій, навколишнього природного середовища та майна від надзвичайних ситуацій шляхом запобігання таким ситуаціям, ліквідації їх наслідків і надання допомоги постраждалим у мирний час та в особливий період. При цьому система мінімізації наслідків НС повинна будуватись в рамках Єдиної державної системи цивільного захисту (ЄДС ЦЗ), основи функціонування якої викладені в Розділі II Кодексу цивільного захисту України. Єдина державна система цивільного захисту забезпечує реалізацію політики у сфері цивільного захисту та складається з функціональних та територіальних підсистем та їх ланок (рис. 1.3).

Наукові дослідження спрямовані на вирішення таких основних завдань ЄДС ЦЗ, як: забезпечення готовності міністерств та інших центральних та місцевих органів виконавчої влади, органів місцевого самоврядування, підпорядкованих їм сил і засобів до дій, спрямованих на запобігання і реагування на надзвичайні ситуації; захист населення у разі виникнення надзвичайних ситуацій; проведення рятувальних та інших невідкладних робіт щодо ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій, організація життєзабезпечення постраждалого населення та пом'якшення можливих наслідків надзвичайних ситуацій у разі їх виникнення [40].

Серед основних об'єктів навколишнього середовища, на яке впливають наслідки надзвичайної ситуації, є повітря, вода та ґрунт. Згідно Закону України про охорону навколишнього природного середовища [41] пріоритет серед цих об'єктів має повітря. Такий саме висновок можна зробити порівнявши гранично допустимі концентрації у повітрі [46], воді [41], та ґрунті [42].

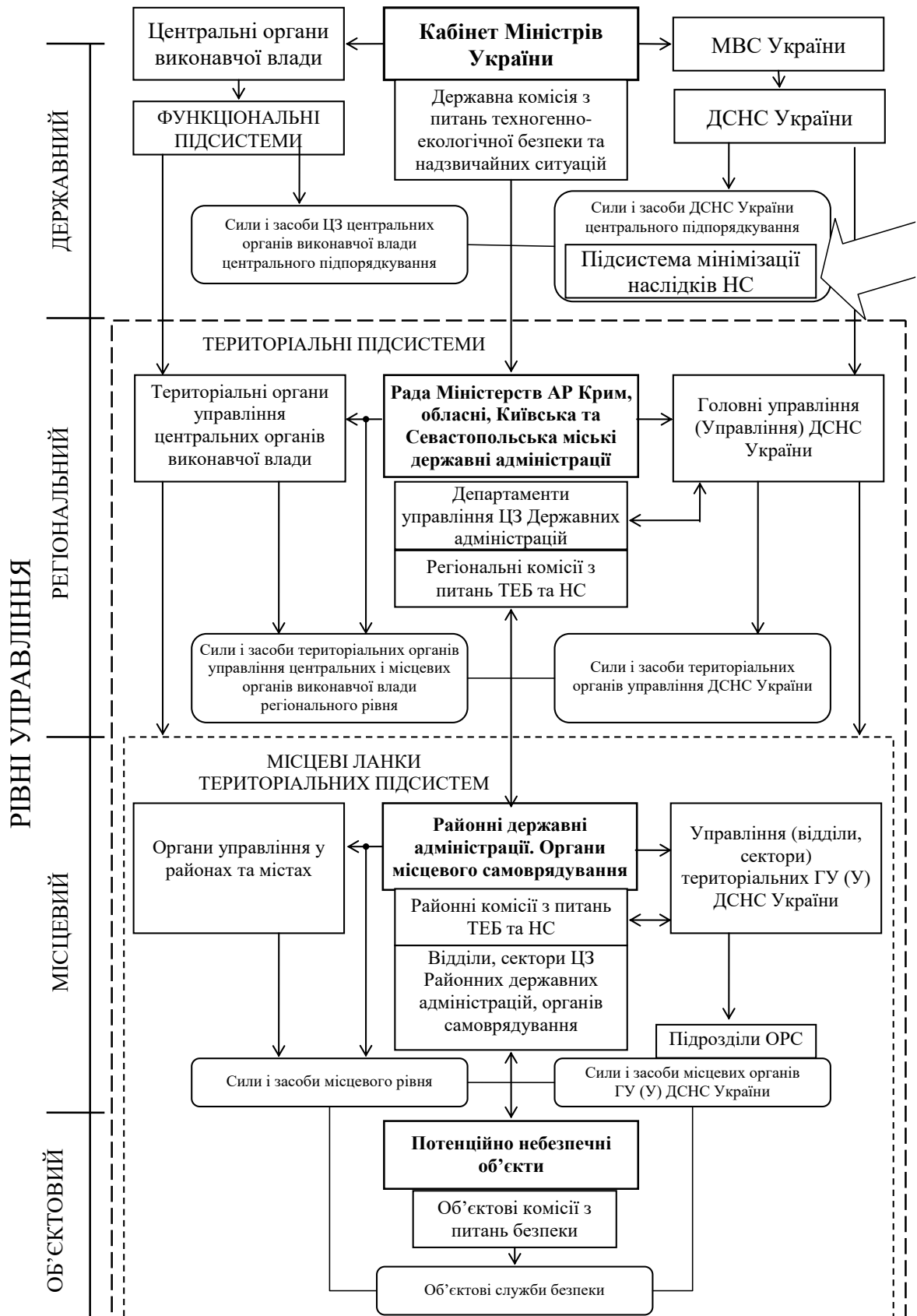


Рис. 1.3. Схема побудови та управління ЄДС ЦЗ з включенням підсистеми мінімізації наслідків НС для атмосферного повітря

Це пов'язано з часом існування живих істот, насамперед людини, без доступу до цих об'єктів та швидкості поширення зони забруднення. Відповідно у разі виникнення НС першочерговим завданням є мінімізація наслідків НС для атмосфери.

На сьогодні забезпечення цивільного захисту навколишнього атмосферного середовища ґрунтується на двох складових – це моніторинг хімічного складу повітря та локалізація шкідливих речовин у місцях їхнього утворення.

Моніторинг хімічного складу повітря в нижній атмосфері здійснює Державна система моніторингу довкілля (ДСМД), що діє відповідно до постанови Кабінету Міністрів України [41]. Створення такої системи передбачено на законодавчому рівні [40].

Локалізація шкідливих речовин у місцях їхнього утворення здійснюється шляхом очищення викидів від шкідливих речовин в апаратах очищення, встановлених у випускній системі, збору шкідливих речовин, їхнього безпечного зберігання та захоронення [43].

Як видно з аналізу, існуючі системи спрямовані на запобігання небезпечним викидам в атмосферу та не дозволяють забезпечити належний рівень захисту населення, територій та навколишнього середовища у разі виникнення надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру. Така концепція забезпечення безпеки повністю себе виправдовує при нормальних умовах життєдіяльності, тому що набагато простіше технічно й економічно менш витратно реалізувати систему запобігання забрудненню, ніж систему ліквідації забруднення. Однак при виникненні надзвичайних ситуацій природного або техногенного характеру, які відбуваються з тим або іншим ступенем імовірності, існуючі підходи до забезпечення цивільного захисту не можуть вирішити проблему мінімізації наслідків надзвичайних ситуацій для атмосфери.

Загальна структура системи забезпечення цивільного захисту складається із чотирьох основних блоків: об'єкт впливу, система

моніторингу, система підтримки ухвалення рішення та система виконання рішення [65, 66].

Структура моніторингу надзвичайних ситуацій складається із трьох рівнів [67, 68]. До першого рівня відносяться пристрої реєстрації небезпечних факторів або метеорологічних параметрів. Такі прилади можуть застосовуватись як для реєстрації одного параметра, так і декількох параметрів паралельно. Оскільки контроль параметрів необхідно проводити в різних точках простору, то пристрої контролю можуть бути рознесені по горизонталі (у точках із різними географічними координатами) та по вертикалі (контроль параметрів на різних висотах).

Отримана засобами контролю параметрів первинна інформація з кабелів або радіоканалів передається до приладів другого рівня, які призначені для обробки отриманої інформації та надання її на третій рівень у зручній формі. На третьому рівні проводиться аналіз отриманої інформації та приймається рішення про подальші дії з ліквідації надзвичайної ситуації.

У системі підтримки ухвалення рішення особа, що приймає рішення, визначає один або кілька критеріїв, з урахуванням яких здійснюється прогностичне моделювання зони поширення забруднення та формуються управлінські рішення, які обґрунтовані відповідними розрахунками.

Одержавши набір варіантів управлінських рішень, особа, що приймає рішення, обирає один з них, або задає ще додаткові критерії.

Затверджене відповідальною особою рішення передається в систему виконання рішення, де виконується його формалізація та доведення до виконавців, які впливають на процеси забезпечення цивільного захисту та зону забруднення. Зміни стану об'єкта впливу викликають зміни у величинах вимірюваних параметрів, які фіксуються засобами моніторингу. Далі ці зміни обробляються та подальше моделювання показує ефективність виконання прийнятих управлінських рішень – контур керування замкнуто.

Ліквідація аварій на ХНО також повинна включати в себе обов'язкові етапи кризового контуру управління – моніторинг, прогнозування, прийняття

управлінського рішення та безпосередній вплив на аварію [69]. Серед основних видів впливу на надзвичайну ситуацію найбільшу ефективність набули способи захисту від негативного впливу та мінімізації негативних наслідків аварії [70]. При цьому на правильність прийнятого управлінського рішення безпосередньо впливає точність прогнозування розвитку НС.

Найбільш ефективним методом зниження небезпек при таких НС є осадження газоповітряної хмари небезпечної хімічної речовини дрібно розпиленими водними струменями [71]. Дрібнодисперсні водні струмені створюються рятувальними підрозділами на шляху розповсюдження небезпечної хмари газу. За рахунок широкого розповсюдження об'єктів очистки стічних вод, на яких використовується хлор, аварії з викидом газоподібного хлору набули широкого розповсюдження. Осадження хмари газоподібної НХР дозволяє суттєво зменшити розміри зони забруднення [72] та при певних умовах взагалі припинити розповсюдження небезпечних газів [20]. Однак в роботі [73] визначається лише вплив інтенсивності подачі води на осадження хмари без врахування дисперсності потоку. Проте оптимізація дисперсності водяного потоку дозволяє майже вдвічі скоротити час осадження небезпечної речовини [74]. Додаткового збільшення інтенсивності осадження небезпечних газів з повітря можна досягти за рахунок хімічних добавок до води, які збільшують швидкість сорбції газу та нейтралізують його [75]. Ці фактори необхідно врахувати при моделюванні процесів осадження небезпечних газів.

З метою забезпечення безпеки праці оперативно-рятувальних підрозділів в зоні НС з викидом НХР та прийняття управлінського рішення по евакуації населення важливим є проведення коректного моніторингу та точного прогнозування розвитку надзвичайної ситуації. Для прогнозування розмірів зони викиду НХР та розподілу концентрації НХР необхідне врахування значної кількості факторів – метеорологічних умов, фізико-хімічних властивостей НХР, просторових характеристик об'єкту, де сталася аварія та інше. При цьому прийняття управлінського рішення по

найнебезпечнішому варіанту прогнозу є недоцільним, так як це призведе до значних не виправданих збитків при організації евакуації населення та матеріальних цінностей.

Таким чином, проведено аналіз статистики виникнення та протікання процесу ліквідації надзвичайних ситуацій в Україні та інших країнах світу. Результати аналізу показали, що переважною причиною виникнення НС з викидом небезпечних речовин є людський фактор та зношення обладнання, а основною характеристикою таких аварій є швидке розповсюдження зони ураження на велику площу. Визначено, що нові методи та системи ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних речовин необхідно реалізовувати в рамках функціонування в Україні Єдиної державної системи цивільного захисту на основі класичного контуру управління, що забезпечує збір, обробку та аналіз інформації, моделювання розвитку небезпечної ситуації в зоні ураження та використання ефективних способів осадження небезпечних газів з атмосфери.

1.3. Існуючі методики прогнозування наслідків викидів небезпечних хімічних речовин при надзвичайних ситуаціях техногенного характеру

Для забезпечення достатньої точності розрахунку розмірів зон хімічного забруднення необхідне врахування значної кількості факторів, які умовно можна розподілити на два блоки – метеорологічні умови та параметри викиду. До метеорологічних умов відносяться напрямок та швидкість вітру, температура та вологість повітря, атмосферний тиск. До параметрів викиду відносяться вид хімічної речовини, її температура, густина та тиск зберігання, інтенсивність викиду. За умов роботи оперативно-рятувальних підрозділів по локалізації зони викиду до цих факторів додається ще один блок, який включає інтенсивність подачі рідини на осадження, площа осадження, здатність рідини, що подається, до

поглинання чи хімічної реакції з небезпечною хімічною речовиною та ін. Це все суттєво ускладнює роботу штабу з ліквідації надзвичайної ситуації по прогнозуванню масштабів ураження, що може привести до прийняття запізнених та хибних управлінських рішень.

1.3.1. Математичні моделі прогнозування наслідків викидів небезпечних хімічних речовин при надзвичайних ситуаціях

Аналіз показав, що більшість математичних моделей опису розповсюдження небезпечних газів в атмосфері засновані на рівняннях Гауса. В подальшому ці моделі вдосконалювались та розвивались багатьма вченими. Так наприклад гаусівська модель, що удосконалена Паскуїллом та Гіффордом використовується МАГАТЕ, як основна модель для практичного прогнозування наслідків радіоактивного забруднення. Основною перевагою моделі Паскуїлла-Гіффорда є простота реалізації [76, 77]. Для стаціонарного режиму ця модель має вигляд:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \cdot \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] \cdot \left\{ \exp\left[-\frac{(z - H_{ef})^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z + H_{ef})^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \cdot f \quad (1.1)$$

де Q – потужність неперервного джерела, [г/с]; u – швидкість вітру на висоті H_{ef} , [м/с]; H_{ef} – ефективна висота підйому факела викиду, [м]; σ_x – дисперсія в напрямку вісі Ox , [м]; σ_y – горизонтальна дисперсія, [м]; σ_z – вертикальна дисперсія, [м]; t – момент часу, для якого визначається розподіл концентрації газу, [с]; f – коефіцієнт, який визначає зміну з часом концентрації забруднення за рахунок взаємодії з навколишнім середовищем, [1/с].

Дана модель дозволяє визначати рівень концентрації небезпечного газу лише для точкового джерела викиду, не враховує напрямок вітру, рельєф місцевості та не дозволяє визначати рівень концентрації за умов короткочасного та довготривалого викидів. При цьому приймається припущення про сталість швидкості вітру в усьому об'ємі.

Врахування більшої кількості факторів, та відповідно й отримання більш точного результату прогнозування дозволяє використання моделей розповсюдження газів на основі рівнянь турбулентної дифузії.

В загальному вигляді задача прогнозу розповсюдження газу в атмосфері математично може бути визначена як розв'язок в декартовій системі координат $Oxyz$ при певних початкових та граничних умовах наступного диференціального рівняння:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial (w - w_s)C}{\partial z} + \alpha C = \\ = \frac{\partial}{\partial x} k_x \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} k_y \frac{\partial C}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial C}{\partial z} + \sum_{i=1}^n Q_i(t) \delta(r - r_i(t)) \end{aligned} \quad (1.2)$$

де $C(x, y, z, t)$ – концентрація небезпечного газу, $[г/м^3]$; t – час, $[с]$; u, v, w – компоненти поля вітру за напрямком осей x, y, z , відповідно, $[м/с]$; k_x, k_y, k_z – коефіцієнти турбулентної дифузії, $[м^2/с]$; w_s – швидкість гравітаційного осадження газу, $[м/с]$; α – коефіцієнт, який визначає зміну з часом концентрації забруднення за рахунок взаємодії з навколишнім середовищем, $[1/с]$; Q_i – потужність джерела викиду, $[г/с]$; $\delta(r - r_i)$ – дельта-функція Дірака; $r_i = (x_i, y_i, z_i)$ – місцезнаходження точкових джерел викиду.

Використання таких моделей дозволяє досліджувати поширення небезпечних газів від джерел різного типу при різних характеристиках середовища. Вони дають можливість використовувати параметри турбулентного обміну, які використовуються в метрологічних задачах про тепло- та вологообмін в атмосфері [8].

Рівняння (1.2) може описувати як просторовий розподіл середніх концентрацій газу, так і їх зміну в часі. Розв'язання рівнянь турбулентної дифузії дозволяє проводити прогнозування наслідків викиду небезпечних газів при стаціонарних та нестаціонарних умовах атмосфери. Суттєвою перевагою є можливість врахування процесів протікання хімічних реакцій із компонентами повітря, а також врахування декількох джерел викиду з різними параметрами.

Основним недоліком такого підходу є необхідність точного визначення великої кількості вхідних параметрів, що практично неможливо забезпечити в умовах ліквідації надзвичайної ситуації, а також складність аналітичного розв'язку. Для зниження негативного впливу цих факторів зазвичай використовують цілу низку припущень. Нижче розглянемо найбільш розповсюджений підхід.

Стаціонарний розподіл концентрації нестійкого газу в необмеженому просторі $-\infty < x, y, z < \infty$, яка створюється точковим джерелом газу, яке знаходиться в точці (x_0, y_0, z_0) , потужністю Q , описується моделлю [78]:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{4\pi k} \frac{\exp\left(-\sqrt{\frac{\alpha}{k}}|r - r_0|\right)}{|r - r_0|}, \quad (1.3)$$

де $|r - r_0| = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2}$ – відстань від джерела до довільної точки простору.

Для точкового джерела нестійкого газу, яке знаходиться на висоті H над газонепроникною площиною $z = 0$ стаціонарний розподіл концентрації буде описуватись виразом:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{4\pi k} \left(\frac{\exp\left(-\sqrt{\frac{\alpha}{k}}|r-r_0|\right)}{|r-r_0|} + \frac{\exp\left(-\sqrt{\frac{\alpha}{k}}|r-r_1|\right)}{|r-r_1|} \right), \quad (1.4)$$

$$\text{де } |r-r_0| = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-H)^2},$$

$$|r-r_1| = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z+H)^2}.$$

Дані моделі дозволяють визначати розподіл концентрації небезпечного газу лише за рахунок дифузії, тобто за відсутності конвективного перенесення. Однак при цьому приймається припущення про відсутність впливу рельєфу, однорідність атмосфери та неможливість визначати рівень концентрації за умов короткочасного, миттєвого та довготривалого викидів. Відповідно при цьому втрачається більшість переваг саме рівнянь турбулентної дифузії.

Широкого розповсюдження в теорії та практиці набули моделі, які розробив та розвинув Берлянд [8]. Дані моделі враховують неоднорідність атмосфери степеневими залежностями змін вертикального та горизонтального коефіцієнтів турбулентної дифузії, та швидкості вітру з висотою і для випадку небезпечних газів мають вигляд:

$$C(x, y, z) = \frac{Q(zH_{ef})^{\frac{1-m}{2}} z_1^m}{2(2+n-m)k_1\sqrt{\pi k_0}x^3} \exp\left(-\frac{y^2}{4k_0x} - \frac{u_1 z_1^{m-n}(z^{2+n-m} + H_{ef}^{2+n-m})}{k_1(2+n-m)^2 x}\right) \times \quad (1.5)$$

$$\times I^{-\frac{1-m}{2+n-m}} \left[\frac{2u_1 z_1^{m-n} (H_{ef} z)^{\frac{2+n-m}{2}}}{k_1(2+n-m)^2 x} \right]$$

де u_1 – швидкість вітру на висоті z_1 ; k_1 – значення вертикального коефіцієнта турбулентної дифузії на висоті z_1 ; n та m – безрозмірні параметри, які

залежать від стійкості атмосфери; $u = u_1 \left(\frac{z}{z_1} \right)^n$, $k_z = k_1 \left(\frac{z}{z_1} \right)^m$,
 $k_y = k_0 u = k_0 u_1 \left(\frac{z}{z_1} \right)^n$.

Модель Берлянда не дозволяє визначати рівень концентрації за умов миттєвого, короткочасного та довготривалого викидів. Також дана модель не дозволяє враховувати процес осадження небезпечних газів дисперсними потоками при їх активному осадженні рятувальними підрозділами.

1.3.2. Методики прогнозування хімічної обстановки при аваріях з викидом небезпечних хімічних речовин в Україні

При масштабних викидах є необхідним передчасне прогнозування масштабів хімічного забруднення. Це дозволяє забезпечити безпеку праці рятувальників в зоні аварії та ефективно організувати евакуацію населення та матеріальних цінностей з можливих зон ураження [79]. Для оперативного прогнозування наслідків хімічного забруднення атмосфери використовуються різні підходи. Одним із методів прогнозування наслідків атмосферного забруднення є розрахунок майбутньої ситуації на основі динаміки її розвитку [80]. Такі підходи дозволяють враховувати всі фактори розвитку аварії. Це досягається за рахунок обробки великого масиву моніторингової інформації за допомогою рекурентного аналізу [81]. Однак, точність прогнозування такого методу напряму залежить від об'єму бази моніторингових даних. В умовах надзвичайних ситуацій зазвичай неможливо зібрати великий масив даних із достатньою точністю.

Найбільшу розповсюдженість набули експрес-методики, які враховують лише найсуттєвіші фактори з певним кроком зміни параметрів [82]. Такий підхід дозволяє спростити процедуру розрахунку та збільшити оперативність роботи, однак має низьку точність прогнозування.

З метою забезпечення достатньої точності розрахунку розмірів зон хімічного забруднення необхідне врахування значної кількості факторів, які умовно можна розподілити на два блоки – метеорологічні умови, параметри викиду та параметри осадження небезпечного газу. До метеорологічних умов відносяться напрямок та швидкість вітру, температура та вологість повітря, атмосферний тиск. До параметрів викиду відносяться вид хімічної речовини, її температура, густина та тиск зберігання, інтенсивність викиду. За умов роботи оперативно-рятувальних підрозділів по локалізації зони викиду до цих факторів додається ще один блок, який включає інтенсивність подачі рідини на осадження, площа осадження, здатність рідини, що подається, до поглинання чи хімічної реакції з небезпечною хімічною речовиною та ін. [79]. Це все суттєво ускладнює роботу штабу з ліквідації надзвичайної ситуації по прогнозуванню масштабів ураження, що може привести до прийняття запізнених та хибних управлінських рішень.

Методика прогнозування наслідків НС з викидом НХР для використання підрозділами Державної служби України з надзвичайних ситуацій затверджена Наказом МВС України № 1000 від 29.11.2019 року. Ця методика дозволяє спростити розрахунок розмірів зони розповсюдження хмари НХР за рахунок табулювання основних показників. Проте дана методика не дозволяє автоматично візуалізувати результати прогнозування.

Ця методика може бути використана для довгострокового (оперативного) і аварійного прогнозування при аваріях на ХНО і транспорті, а також для визначення ступеня хімічної небезпеки ХНО і адміністративно-територіальних одиниць [83].

Методика застосовується тільки для НХР, які зберігаються у газоподібному або рідкому стані і які в момент викиду, виливу переходять у газоподібний стан і створюють первинну або вторинну хмару НХР та передбачає проведення розрахунків для планування заходів щодо захисту

населення тільки на висотах до 10 м над поверхнею землі (приземному шарі повітря).

Вона подається у вигляді таблиць, що унеможлиблює тривалі розрахунки і дає змогу оперативного здійснювати прогнозування масштабів забруднення.

Прогнозування і оцінка хімічної обстановки під час аварій на ХНО і транспорті здійснюється для визначення:

1. Можливих наслідків аварій, порядку дій у зоні можливого забруднення і вжиття заходів для захисту людей – аварійне прогнозування;
2. Ступеня хімічної небезпеки, які зберігаються або використовуються НХР, і адміністративно-територіальних одиниць, в межах яких живе населення пов'язано з ризиком його ураження НХР – довгострокове (оперативне) прогнозування.

Критерієм, за яким класифікуються території та об'єкти щодо їх хімічної небезпеки є: кількість населення і розмір площі що може потрапити в зону можливого зараження у випадку аварії на ХНО.

Зона можливого хімічного зараження (ЗМХЗ) – це територія, в межах якої під впливом зміни напрямку вітру може виникнути переміщення хмари НХР з небезпечними для людини концентраціями. Зона наноситься на карту (план) місцевості у вигляді кола, півкола, чверть кола, однієї восьмої кола залежно від швидкості вітру.

Радіус кола (сектора) дорівнює глибині поширення хмари зараженого повітря Γ , а бісектриса сектора збігається із віссю хмари і орієнтована в напрямку вітру.

При прогнозуванні обстановки після аварії визначаються параметри прогнозованої зони хімічного зараження (ПЗХЗ) – розрахункової зони в межах зони можливого хімічного зараження (ЗМХЗ), параметри якої приблизно визначаються за формою рівнобедреного трикутника (сектора)

або за даними розвідки еліпса з кутовим розміром залежно від ступеня вертикальної стійкості повітря (СВПС).

Методика прогнозування і оцінка ХО ґрунтується на тому, що при руйнуванні ємності, в якій зберігається НХР у рідкому чи газоподібному стані, утворюється первинна і вторинна хмара, за якими визначається сумарна глибина прогнозованої зони хімічного зараження, Гпзхз.

Параметри зони хімічного зараження залежить від кількості НХР, що перейшла в первинну і/або вторинну хмару, умов зберігання НХР (ємності обваловані, не обваловані), метеоумов, характеру місцевості та ін.

Первинна хмара НХР – це хмара, яка виникає внаслідок миттєвого переходу (1-2 хв.) в атмосферу пароподібної частини НХР з ємності при її руйнуванні.

Вторинна хмара НХР – це хмара, що виникає внаслідок випаровування речовини з поверхні розливу НХР (підстильної поверхні). Для легко летючих НХР час розвитку вторинної хмари після закінчення дії первинної хмари відсутній [84]. Для інших речовин він залежить від властивостей НХР, стану обвалування та температури повітря.

Для автоматизації роботи з затвердженою методикою розроблено та впроваджено програму «DSNS GIS».

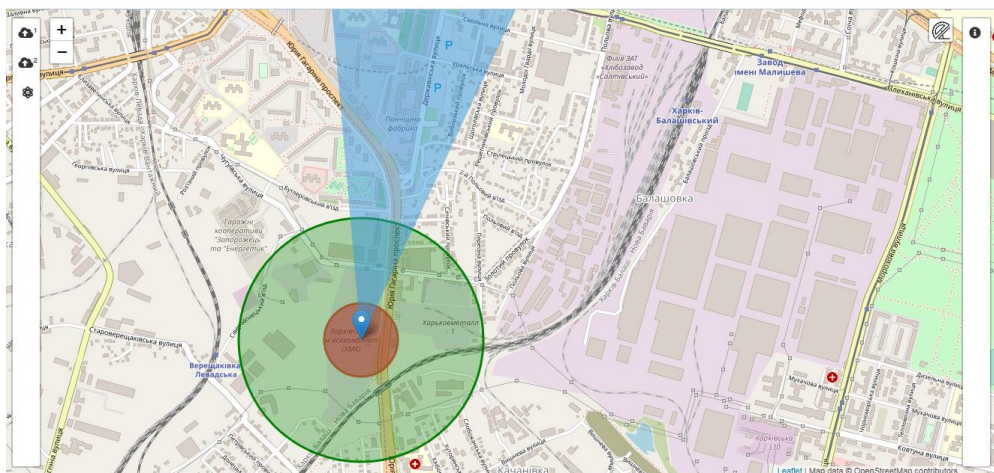


Рис. 3. Інтерфейс результатів прогнозування зони хімічного ураження за допомогою програми «DSNS GIS»

До переваг програми «DSNS GIS» слід віднести можливість розрахунку первинної та вторинної хмари, простота введення даних та визначення осередку ураження, необхідність малої кількості вхідних даних для розрахунку та відповідність розрахунків затвердженій методиці.

Недоліками цієї програми є: низька точність розрахунків, низька чутливість до зміни вихідних параметрів, вузька направленість програми, що звужує галузь застосування та варіанти можливих надзвичайних ситуацій.

В Україні також активно розробляються та використовуються методики прогнозування розповсюдження домішок різноманітної природи в атмосфері на базі гаусівських математичних моделей та рівнянь турбулентної дифузії. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України рекомендовано певний перелік програмних комплексів, що можна використовувати для подібних задач прогнозування. Основними програми розрахунку забруднення атмосфери є «EOL», «EOL + FON», «PLENER», «EOL +», «EOL -2000[h]», «EOL (ГАЗ)-2000[h]», «Еколог – Газ». Вони призначені для проведення розрахунків забруднення від стаціонарних джерел промислових підприємств у приземних і верхніх шарах атмосфери із застосуванням стандартних методик. На сьогодні такі програми активно використовуються промисловими підприємствами на яких відбувається викид речовин в атмосферу та різноманітні установи, що спеціалізуються на захисті атмосферного повітря.

Комплекс програм АРМ ЕКО розроблений Державним підприємством «ДНДІАСБ», на основі якого була створена українська система «ЕКОЛОГІЯ». Ця система здатна значно поліпшити та прискорити процес формування екологічної звітності, а також дає змогу проводити розрахунок розсіювання за затвердженими методиками. Автоматизація роботи з даними дозволяє суттєво спростити та прискорити процес документообігу з питань охорони навколишнього середовища.

Суттєво спростити процес прогнозування наслідків викиду небезпечних речовин дозволяє методика «Повітря», яку розроблено в

Інституті проблем математичних машин та систем НАН України. Ця методика призначена для реалізації однієї з найбільш актуальних задач оперативного моделювання наслідків виливу/викиду небезпечних речовин на хімічно небезпечних об'єктах стаціонарного типу [85].

Методика «Повітря» формує журнал прогнозування викиду та надає можливість здійснювати, як аварійне моделювання, що виконується безпосередньо після виникнення аварії, так і довгострокове для визначення можливих наслідків аварії.

На основі співпраці Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.С. Пухова НАН України та в Державної установи «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України» створено програмно-моделюючий комплекс (ПМК) для вирішення задач екологічного моніторингу на регіональному і локальному рівнях, який забезпечує комплексну оцінку екологічного стану досліджуваних територій [86].

Даний програмний комплекс вирішує такі задачі як обчислення екологічних і техногенних ризиків, визначення залежностей впливу дії забруднювальних речовин на інші фактори, визначення розподілів концентрацій забруднення, оптимізація вибору координат раціонального розміщення пунктів спостережень мережі моніторингу.

1.3.3. Методики прогнозування хімічної обстановки при аваріях з викидом небезпечних хімічних речовин в країнах світу

Активний розвиток комп'ютерних систем автоматичного розрахунку та систем штучного інтелекту дозволяють розробляти програмні комплекси на основі складних математичних моделей, які дозволяють отримувати аналітичні розрахунки із великою кількістю вхідних параметрів та зміні параметрів у динаміці. У зв'язку із активним розвитком систем прогнозування стану атмосфери на сучасному етапі використовують цільовий підхід – процес моделювання та побудови програмного комплексу

проводиться під конкретну задачу із конкретними умовами. Це дозволяє збільшити точність отриманих результатів для заздалегідь визначеної вузької проблеми не ускладнюючі процес розрахунку.

Найвідомішими реалізаціями моделей розповсюдження газів є програмні комплекси HGSYSTEM та ціла низка програм від таких організацій, як TNO (Голландія), Det Norske Veritas (DNV Technica, Норвегія), U.S. Environmental Protection Agency (EPA – Агентство захисту навколишнього середовища США), NIST (Національний інститут стандартів і технологій США), методики класу DEGADIS. Розроблені методики реалізуються у вигляді певних програмних продуктів [87].

Найпоширенішими методиками, які рекомендовані EPA та які вже використовуються в США, Канаді, ЄС є такі системи, як STDMPPLUS, AERMOD, CALPUFF, BLP, CALINE3, [88, 89].

Основними розробниками прикладного програмного забезпечення AERMOD є компанії «Lakes Environmental» (Канада) і «BREEZE» (США).

AERMOD містить такі модулі: 1) AERMOD – модуль математичного моделювання дисперсії домішки в атмосфері; 2) AERMET – модуль визначення необхідних метеоданих на основі розв'язання системи рівнянь ПША; 3) інструментальний набір AERSURFACE для відтворення рельєфу місцевості; 4) AERMAP – програмні засоби, призначені для прив'язки моделі до тривимірних даних місцевого рельєфу та об'єктів. Крім того, в моделях цього класу містяться засоби, що дають змогу враховувати особливості поширення домішки над трасами, водними перешкодами, лісовим масивом і т.д. Використання моделей цього класу пов'язане з істотними витратами і зусиллями під час підготовки вхідних даних і має сенс при оцінюванні екологічних ризиків від промислових джерел забруднення [90]. При EPA створено підрозділ AERMIC, що займається питаннями впровадження в моделі EPA нових концепцій моделювання якості повітря, а також налаштуванням та введенням в експлуатацію моделюючих систем. Саме вченими цього підрозділу було введено в експлуатацію систему AERMOD

для моделювання поширення забруднювальних речовин від різних джерел забруднення (наземних, висотних) в умовах довільного рельєфу місцевості.

Методика CALPUFF використовує сучасну нестационарну, багат шарову, багат функціональну модель, яка імітує поширення забруднювальних речовин від викидів різноманітних джерел забруднення за мінливих метеорологічних умов з урахуванням взаємодії речовин з навколишнім середовищем. Головними компонентами системи моделювання є CALMET – діагностична тримірна метеорологічна модель, CALPUFF – модель дисперсії якості повітря, CALPOST – пакет постобробки.

Методика BLP використовує гаусові моделі дисперсії та може бути використана для випадків коли небезпечні газі можуть потрапити до верхніх шарів атмосфери.

Каліфорнійським департаментом транспорту для визначення рівня забруднення, яке викидає автотранспорт розроблено програмний комплекс CALINE3. Основою є багатогранна стаціонарна гаусова модель дисперсії поширення забруднювальних речовин з підвітряної сторони від шосе та вулиць міста відносно в нескладній місцевості.

На основі моделі гаусового розподілу концентрацій також розроблено програму CAL3QHC. Вона призначена для розрахунку концентрацій забруднень, що утворюються в результаті викидів.

Методика STDMPPLUS також базується на гаусовій моделі поширення викидів точкових джерел забруднення в умовах складного рельєфу. В основному модель використовують за стійкого та нейтрального станів атмосфери. Однак передбачено використання алгоритму в разі нестійкого стану атмосфери.

Особливостями розглянутих вище методик та програмних комплексів є необхідність використання багатоядерного апаратного забезпечення через складні алгоритми отримання аналітичного розв'язання. Це суттєво ускладнює процес прогнозування, що є суттєвим недоліком в умовах ліміту часу в процесі ліквідації надзвичайних ситуацій.

Більш простий підхід запропоновано в методиці HGSYSTEM, яка представляє собою сукупність комп'ютерних програм, розроблених для прогнозування розсіювання аварійних викидів хімічних речовин, густина яких більша за густину повітря.

В Італії розроблено методику ARIES [91] та програмне забезпечення для її реалізації. У системі ARIES основним є модуль PAD, що збирає із встановленого джерела метеорологічні параметри атмосфери та перетворює їх у необхідний для використання формат. Модуль ARCO базується на лагранжевих моделях опису руху домішок, які призначені для оцінювання концентрацій та випадіння в разі складних метеорологічних умов та складної підстилаючої поверхні.

На базі основних кліматичних моделей розроблено програмний модуль AMETISTA для прогнозування якості повітря. Він включає три складові: обробку погодинних метеорологічних параметрів, блок розсіювання, який базується на HPDM модельних рівняннях Хана і Чанга, та статистичну обробку результатів розрахунку.

Для певних умов прогнозування доцільним є використання універсальних систем моделювання: FlowVision, FLUENT, GAS TOOL, PHOENICS, Star-CD та інші, багато з яких існують як в одно-, так і в багатопроцесорній версіях [88]. Розглянемо деякі універсальні системи.

Програмний пакет GAS DYNAMICS TOOL дає змогу розраховувати багатофазні течії з врахуванням хімічної кінетики, перенесення тепла, міжфазних переходів у ділянках складної форми шляхом чисельного рішення тривимірних рівнянь Ейлера або Нав'є–Стокса.

Програмний комплекс FLUENT є одним з найпоширеніших продуктів, що використовується для моделювання процесів газової динаміки із врахуванням турбулентних процесів для газової та дисперсної фази.

Ці програмні комплекси та методики є більш універсальними але при цьому суттєво уповільнюється процес розрахунку та падає точність у порівнянні із ціле орієнтованими підходами.

Значно менше число спеціалізованих програм орієнтовано винятково на багатопроцесорні системи. Наприклад, програмний комплекс ECOSIM включає дві підмоделі MEMO і DYMOS. Перша підмодель описує динаміку забруднень з урахуванням факторів турбулентності. Підмодель DYMOS описує перенесення забруднювальних речовин на основі рівняння дифузії для рухомого середовища, їх взаємні перетворення на основі декілька зміненої хіміко-кінетичної моделі. Хімічні реакції враховуються найточніше шляхом розв'язку системи звичайних диференціальних рівнянь [92].

До окремого сімейства методик відносяться програмні комплекси цільовим образом призначені для використання рятувальниками. Можливість автоматичного нанесення зони хімічного забруднення передбачено в програмному комплексі WISER [93, 94]. Однак недоліком цієї програми є визначення розмірів зон ураження за табличними довідниковими даними без процесу розрахунку та без врахування основних факторів. Суттєво збільшити точність прогнозування дозволяє використання програмного комплексу АЛОНА [95]. Дана програма проводить моделювання розповсюдження небезпечної речовини з використання гаусової моделі розсіювання домішок [96] за введеними параметрами та дозволяє візуалізувати результати прогнозування.

Такі програми дозволяють автоматизувати процес розрахунку із графічною візуалізацією результатів прогнозування та інтеграцією з картою місцевості. Ці програмні комплекси засновані на використанні математичних моделей просторової дифузії газів або моделей Гауса [97]. Використання рівняння дифузії дозволяє враховувати основні метеорологічні параметри навколишнього середовища, в якому розповсюджується газ. Додаткові модифікації цих моделей дозволяють враховувати умови викиду небезпечного газу із технологічного апарату [98]. Це є актуально для умов аварії, коли викид може протікати з різною інтенсивністю або взагалі припинено при блокуванні аварійного апарату.

В США для цих цілей використовується програмний комплекс ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres). Комплекс ALOHA призначений для використання при проведенні розрахунків під час розливу небезпечних хімічних речовин, в допомогу аварійно-рятувальним службам в ліквідації аварій пов'язаних з небезпекою поширення токсичних повітряних мас, теплового випромінюванням від пожеж та ефектів вибуху.

ALOHA використовує графічний інтерфейс для введення даних та відображення результатів. Вплив токсичних хімічних парів, надлишкового тиску, теплового випромінювання або областей, де присутні легкозаймісті гази, представлені графічно та з текстом. Комплекс ALOHA був розроблений та підтримується Відділенням реагування на надзвичайні ситуації, департаментом Національної агенції океану та атмосфери у співпраці з Управлінням надзвичайних ситуацій Агентства з охорони довкілля.

Основою методології ALOHA є моделі дисперсії повітря для оцінки ризику інгаляції, пов'язаної з токсичними хімічними речовинами в повітрі, та ступенем займистої хмари. Ці моделі дисперсії повітря використовуються для прогнозування того, як концентрація забруднювача, коли викидається в атмосферу, коливається залежно від часу та положення. ALOHA включає в себе дві напівемпіричні моделі дисперсії повітря: Гаусова модель використовується для прогнозування напрямку поширення хмари, яка легше повітря; модель Heavy Gas використовується для забруднюючих хмар, які важчі за повітря (Рис. 1.4).

Моделювання атмосферної дисперсії – це математичне моделювання поширення забруднювачів повітря в атмосфері. Воно здійснюється за допомогою комп'ютерних програм і алгоритмів, що імітують дисперсію забруднювача. Дисперсійні моделі використовуються для оцінки концентрації забруднювачів повітря або токсинів, що викидаються з джерел, таких як промислові підприємства, автомобільний рух або випадкові викиди хімічних речовин. Вони також можуть бути використані для прогнозування майбутніх концентрацій в конкретних сценаріях.

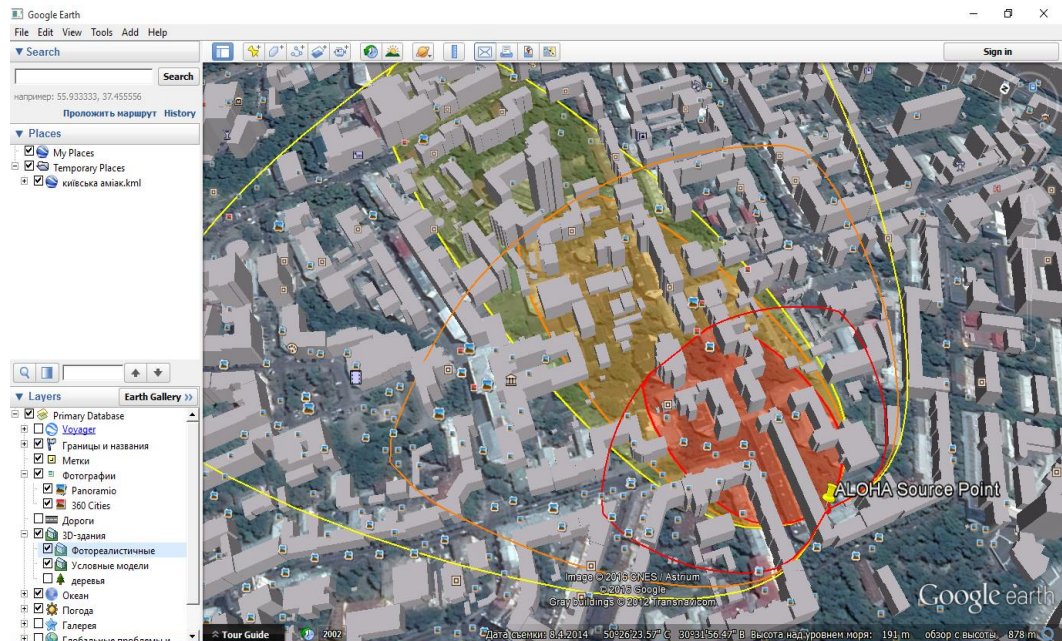


Рис. 1.4. Результати прогнозування за допомогою програми ALOHA

Таким чином, дисперсійні моделі є домінуючим типом моделі, використовуваної при формуванні політики якості повітря. Вони є найбільш корисними при дослідженні забруднюючих речовин, які розосереджені на великі відстані і які можуть вступати в реакцію в атмосфері. Ці моделі також використовуються для забруднюючих речовин, які мають дуже високу просторово-часову мінливість (тобто мають дуже велику відстань до початкового розпаду, таких як вуглець) і для епідеміологічних досліджень статистики земельного використання.

Дисперсійні моделі мають важливе значення для державних установ, які відповідають за захист і управління якістю атмосферного повітря. Моделі, як правило, використовуються для визначення того, чи промислові об'єкти діють згідно з національними стандартами навколишньої якості повітря (NAAQS) в Сполучених Штатах). Моделі також служать для надання допомоги в розробці ефективних стратегій управління з метою зниження викидів шкідливих речовин в атмосферу. Для боротьби із забрудненням атмосферного повітря в Україні затверджено стандарти якості повітря (гранично допустимі концентрації ГДК) на базі яких здійснюються всі заходи

щодо збереження чистоти довкілля. У 1951 р. в СРСР вперше в світі були встановлені національні стандарти у вигляді ГДК для найпоширеніших атмосферних забруднень. Зараз у нашій країні нормовано вміст в атмосферному повітрі населених пунктів понад 160 токсичних хімічних сполук.

Моделі розсіювання повітря також використовують для планування випадкових викидів хімічних речовин, визначення наслідків аварійних викидів небезпечних або токсичних матеріалів. Аварійні викиди можуть стати причиною пожежі або вибуху, які пов'язані з небезпечними матеріалами, такими як хімічні речовини або радіонукліди. Результати моделювання дисперсії можуть забезпечити оцінку розташування зон впливу та концентрацій в навколишньому середовищі. Відповідні захисні заходи можуть включати в себе евакуацію або укриття на місці для осіб, які перебувають в підвітряний напрямку.

Моделі дисперсій відрізняються залежно від методів, що використовуються для розробки моделі, але всі вони вимагають вхідних даних:

Концентрація або кількість токсинів в емісії і температура матеріалу

Викиди або такі параметри, як висота розташування джерела, тип джерела (тобто, вогонь, басейн або вентиляційний стік) і швидкість виходу, температура на виході і швидкість вивільнення.

Розташування, висота і ширина яких-небудь перешкод (наприклад, будівель або інших споруд) на шляху випромінюваного газового факела, шорсткість поверхні (або більш загальне означення – «сільська» або «міська» місцевість).

Моделі розсіювання в атмосфері також відомі як атмосферні дифузійні моделі, моделі розсіювання повітря, моделі якості повітря і моделі розсіювання забруднення повітря. Гаусові моделі засновані на гіпотезі, що розподіл часток у потоці або хмарі близький до нормального.

Візуалізовану проекцію зон хімічного забруднення безпосередньо нанесену на карту місцевості із зазначення розподілу по рівням небезпеки. Така карта дуже зручна для оперативної роботи штабу з ліквідації надзвичайної ситуації. На ній можна визначати будівля, що підлягають евакуації, шляхи евакуації, збірні пункти та інше.

Однак всі перелічені вищі підходи не враховують осадження хмари НХР оперативно-рятувальними підрозділами. Осадження небезпечних газів з атмосфери відбувається за рахунок протікання процесів сорбції [99]. При цьому інтенсивність сорбції залежить не тільки від навколишніх умов, а й від поверхневих властивостей рідини та фізико-хімічних властивостей газу [19]. Так, наприклад, інтенсивність осадження аміаку чистою водою у порівнянні із хлором у 7–8 разів більша при однакових умовах. Для теоретичного опису процесу сорбції використовуються, як безперервні моделі молекулярної динаміки [100], так й моделі пошарового масообміну [101]. Однак такі моделі не враховують просторовий розподіл газу та його динаміку під впливом зовнішніх умов. В роботі [16] висловлені припущення за якими може проводитись опис сукупного процесу розповсюдження газу у просторі при його осадженні дисперсними струменями. В цій роботі передбачені умови локалізації викиду небезпечного газу аварійно-рятувальними підрозділами. Враховано можливість варіації розмірів, форми та кількості розпилюючих пристроїв та інтенсивності подачі рідини. В роботі [17] розроблена модель прогнозування масштабів хімічного ураження за умов осадження небезпечної хмари та алгоритм її використання. Однак, експериментальна перевірка достовірності розробленої моделі не проведено.

Проведено аналіз функціональних можливостей трьох методів прогнозування зони хімічного забруднення при виникненні надзвичайної ситуації: Методики прогнозування наслідків розливу (викиду) небезпечних хімічних речовин при аваріях на промислових об'єктах та транспорті; програмні продукти США «ALONA» та ЧПБ НУЦЗУ «DSNS GIS». В результаті аналізу виявлені наступні переваги та недоліки:

1. Методики прогнозування наслідків розливу (викиду) небезпечних хімічних речовин при аваріях на промислових об'єктах та транспорті:

Переваги: - підкріплені законодавчою базою;

- простота використання;
- швидкість розрахунку;
- мала кількість вихідних параметрів.

Недоліки: - низька точність розрахунку;

- необхідність власноручного розрахунку;
- вузький перелік умов для яких можливе застосування;
- дуже обмежений перелік небезпечних хімічних речовин.

2. Програмний комплекс «DSNS GIS»:

Переваги: - автоматизація розрахунків;

- наочність накладання зони ураження на карту;
- відповідність затвердженій методиці розрахунків;
- швидкість розрахунку;
- простота використання.

Недоліки: - низька чутливість до зміни вихідних параметрів;

- обмежений перелік небезпечних хімічних речовин;
- низька точність розрахунку;

3. Програмний комплекс «АЛОНА»

Переваги: - автоматизація розрахунків;

- висока точність розрахунків;
- точність визначення осередку викиду;
- наочність накладання зони ураження на карту;
- можливість визначення зони ураження при вибуху;
- широкий діапазон випадків аварії, для яких можливе застосування програми;

застосування програми;

- велика база небезпечних хімічних речовин з їх основними властивостями;

- можливість додавання нових небезпечних хімічних речовин до бази даних;
- можливість додавання та уточнення основних параметрів небезпечних хімічних речовин;
- розрахунок зон ураження по трьом рівням безпеки, які відповідають міжнародним стандартам або визначаються власноруч;
- інтегрування роботи із станціями гідрометеорологічного контролю.

Недоліки: - необхідність великої кількості вихідних параметрів;

- не враховується ландшафт місцевості;
- не враховується можливість протікання хімічної реакції;
- не враховується випадки випадіння опадів над зоною ураження.

Таким чином, проведено аналіз різних підходів до прогнозування зон хімічного забруднення, що застосовується в Україні та інших розвинених країнах світу. Аналіз показав, що кожен з підходів має свої переваги та недоліки. Основною тенденцією розвитку систем прогнозування наслідків НС є автоматизація процесу розрахунку та інтеграція картографічних додатків до програмного комплексу прогнозування наслідків НС. Визначено, що на даний час не існує методик прогнозування наслідків аварій з викидом небезпечних хімічних речовин, який здатен враховувати процеси осадження небезпечних газів з атмосфери дисперсними потоками.

Висновки по розділу 1

1. Встановлено, що надзвичайні ситуації з викидом небезпечних речовин в атмосферу за національним класифікатором відносяться до трьох підкласів НС техногенного характеру - НС унаслідок аварій чи катастроф на транспорті; НС з викидом НХР та НС унаслідок наявності у навколишньому середовищі шкідливих речовин понад ГДК. Визначено, що правові основи для створення системи ліквідації надзвичайних ситуацій з викидом

небезпечних речовин на хімічно небезпечних об'єктах закріплені в законах та інших підзаконних актах, які ґрунтуються на міжнародній правовій базі.

2. Проведено аналіз статистики виникнення та протікання процесу ліквідації надзвичайних ситуацій в Україні та інших країнах світу. Результати аналізу показали, що переважною причиною виникнення НС на хімічно небезпечних об'єктах є людський фактор та зношення обладнання, а основною характеристикою таких аварій є швидке розповсюдження зони ураження на велику площу. Визначено, що нові методи та системи ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних речовин необхідно реалізовувати в рамках функціонування в Україні Єдиної державної системи цивільного захисту на основі класичного контуру управління, що забезпечує збір, обробку та аналіз інформації, моделювання розвитку небезпечної ситуації в зоні ураження та використання ефективних способів осадження небезпечних газів з атмосфери.

3. Проведено аналіз різних підходів до прогнозування зон хімічного забруднення, що застосовується в Україні та інших розвинених країнах світу. Аналіз показав, що кожен з підходів має свої переваги та недоліки. Основною тенденцією розвитку систем прогнозування наслідків НС є автоматизація процесу розрахунку та інтеграція картографічних додатків до програмного комплексу прогнозування наслідків НС. Визначено, що на даний час не існує методик прогнозування наслідків аварій з викидом небезпечних хімічних речовин, який здатен враховувати процеси осадження небезпечних газів з атмосфери дисперсними потоками.

РОЗДІЛ 2.

РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ПРОГНОЗУВАННЯ ХІМІЧНОЇ ОБСТАНОВКИ ПРИ АВАРІЯХ З ВИКИДОМ НЕБЕЗПЕЧНИХ ГАЗІВ

Проведено формалізовану постановку задачі моделювання процесів розповсюдження газів з атмосфери з їх паралельним осадженням. Визначено припущення, які використовуються в процесі моделювання.

Проведено теоретичне моделювання та експериментальна перевірка сорбційних процесів небезпечних газів дисперсними потоками в атмосфері, як одного з ключових етапів процесу осадження газів з атмосфери.

Розроблена математична модель комплексного процесу динаміки розповсюдження небезпечних газів в атмосфері з точкових джерел та паралельного його осадження дисперсними потоками з різними параметрами та метод її розв'язання.

Розроблено та обґрунтовано керуючий алгоритм методики прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів та його осадження дисперсними потоками.

Основні результати розділу викладені в публікаціях [16, 17, 19-21, 24, 27, 28].

2.1. Математична модель прогнозування хімічної обстановки при аваріях з викидом небезпечних газів

Розробляти математичну модель будемо наступним чином: по-перше, розглянемо постановку задачі просторового розподілу концентрації газу при викиді з точкового джерела та припущення для математичного опису динаміки розповсюдження та осадження газу. Наступним кроком буде моделювання сорбційних процесів небезпечних газів дисперсними потоками з різними фізико-хімічними властивостями. Після цього, узагальнюючи отримані результати, розробимо математичну модель прогнозування

наслідків надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів та методи її розвитку.

2.1.1. Формалізація задачі просторового розподілу концентрації газу при викиді з точкового джерела

В роботі розглядається задача точкового викиду газоподібної небезпечної хімічної речовини, що зберігається або транспортується в технологічному апараті під тиском. Хмара НХР розповсюджується за напрямком вітру. По ходу розповсюдження хмари може відбуватись її осадження дрібнодисперсним водяним потоком, який подається або стаціонарними приладами забезпечення безпеки на об'єкті або пересувними приладами оперативно-рятувальних підрозділів. Відповідно до цього кількість струменів для осадження, їх інтенсивність, площа покриття та розташування може бути довільним. У загальному вигляді схематично процес розповсюдження та осадження хмари НХР можна представити відповідно до рис. 2.1 [17].

При будь-яких параметрах струменів для осадження хмари небезпечної речовини процес розповсюдження хмари можна розділити на окремі ділянки. По-перше відбувається довільне розповсюдження небезпечного газу з точки викиду до зони осадження. В зоні осадження відбувається осадження НХР тієї концентрації що надійшла до цієї зони. Далі відбувається довільне розповсюдження хмари з концентрацією НХР, що вийшла із зони осадження. Ці етапи можуть чередуватись, відповідно до вихідної ситуації.

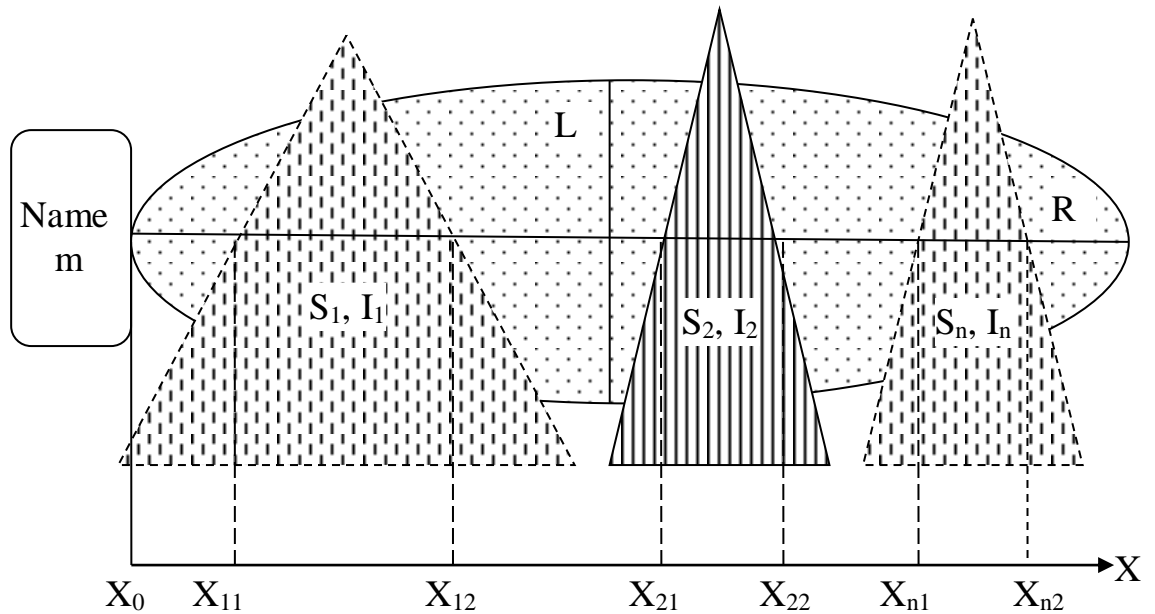


Рис. 2.1. Графічна інтерпретація задачі прогнозування розмірів (R, L) зони хімічного ураження при осадженні НХР дрібнодисперсним потоком різної інтенсивності (I) та площі (S).

При описанні процесів розповсюдження та осадження газоподібних речовин будемо виходити з наступних припущень:

1. Викид НХР відбувається з точкового отвору при розгерметизації технологічного апарату.
2. Розгерметизація технологічного апарату відбувається миттєво, тому інтенсивність викиду НХР у часі може бути описана ступінчастою функцією.
3. Розповсюдження НХР у повітрі відбувається шляхом дифузії і переносу вітром. При цьому коефіцієнт дифузії однаковий, як в горизонтальному, так і в вертикальному напрямках.
4. Флуктуації швидкості вітру у всіх напрямках незначні у порівнянні із масштабами викиду та точністю прогнозування та ними можна нехтувати.
5. Інтенсивність та дисперсність поданої на осадження води однакова у всіх точках об'єму осадження та не змінюється з часом.
6. Потік води для осадження НХР подається на усю глибину хмари та по всій висоті хмари.

7. Розміри молекул НХР нехтовно малі у порівнянні з розмірами водяних крапель.

8. Швидкість падіння водяних крапель нехтовно мала у порівнянні із швидкістю руху молекул НХР.

9. Під час прольоту крізь хмару НХР крапля води не встигає абсорбувати достатню кількість НХР для досягнення рівноваги, тому швидкість десорбції НХР буде нехтовно малою у порівнянні зі швидкістю абсорбції [16].

2.1.2. Моделювання сорбційних процесів небезпечних газів дисперсними потоками

Кінетика поглинання газу рідкими аерозолями досить складна і багатофакторна. Сьогодні існує два принципово різних шляхи вирішення цієї проблеми. Існують відмінності в точності розв'язку, кількості необхідного часу обчислень, кількості вхідних даних і необхідності початкових дослідницьких експериментів.

З метою підвищення точності математичного опису процесу абсорбції та універсальності методів розрахунку останнім часом набули поширення імітаційні моделі.

При цьому існує два різних підходи до побудови моделей – кінетична багат шарова модель (kinetic multilayer model for gas particles (KM-GAP)) [102] та молекулярно-динамічна (MD) імітаційна модель [103]. Модель MD працює на спеціальній комп'ютерній розрахунковій платформі GROMACS з додатковим доповненням для розрахунку поглинання рідкими аерозолями TIP4P-Ew. У роботі [13] проведено порівняльний аналіз таких моделей і отримано високий ступінь збіжності результатів розрахунків. І хоча для більшості математичних моделей в модельних комплексах KM-GAP і MD прийняті деякі допущення, що спрощують розрахунок, ці моделі на даний момент є найбільш точними методами чисельного розрахунку швидкості

поглинання газу рідиною. Слід враховувати, що такі розрахунки є досить трудомісткими та вимагають значного часу розрахунків, спеціального програмного забезпечення та значної кількості вхідних даних, які не завжди можна чітко визначити та врахувати.

Моделювання процесів газопоглинання рідкими аерозолями є досить складною та багатофакторною задачею. Однак такі розрахунки є досить трудомісткими та вимагають значного часу на обчислення, спеціального програмного забезпечення та великої кількості вхідних даних. Ці умови важко виконати в умовах ліквідації надзвичайної ситуації.

Шварц С. [104] запропонував розглядати процес абсорбції як окремі фізико-хімічні стадії. Проте математичні виведення запропонованої моделі зроблено з деякими спрощеннями: наприклад, не враховано вплив інтенсивності потоку аерозолю на кінетику поглинання, а також недостатньо уваги приділено визначенню коригувального коефіцієнта. , що в кінцевому підсумку істотно знижує можливості застосування даної моделі. Тому розробка моделей і методів прогнозування швидкості поглинання небезпечних газів, таких як хлор, дрібнодисперсними водними аерозолями є актуальною проблемою.

Відповідно до моделі, запропонованої в [104], процес вимивання забруднюючих атмосферних газів краплями води можна розділити на декілька окремих етапів. Схематично ці етапи показані на рис. 2.2.

Зміст етапів:

1. Перенесення молекул газу (ГГ) на посадкову поверхню за рахунок дифузії в газовій фазі;
2. Адсорбція молекул газу (ГА) поверхнею краплі і рівновага в локальній області поверхні розподілу за рахунок адсорбції газів;
3. Перенесення адсорбованих молекул газу (ГА) в об'єм краплі за рахунок дифузії в рідині;
4. Хімічні реакції поглиненого газу (ГА) і води в об'ємі краплі з утворенням продуктів реакції (ГВ);

5. Перенести продукти реакції (ГВ) в об'єм краплі.
6. Збалансувати локальний об'єм поверхні крапель за рахунок адсорбції та десорбції продуктів хімічної реакції;
7. Перенесення частинок продукту (ГВ) з поверхні краплі в газову фазу за рахунок дифузії.

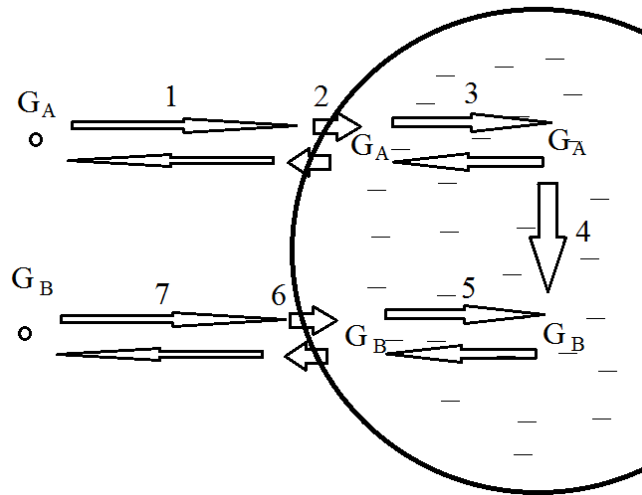


Рис. 2.2. Поетапна схема поглинання хімічно небезпечних газів рідинними дисперсними системами

Як відомо, фізико-хімічні властивості газу істотно впливають на процес сорбції. У зв'язку з цим у таблиці 2.1. розглянуто константи Генрі, коефіцієнт дифузії в повітрі та можливі хімічні реакції у воді для основних небезпечних газів, які потрапляють в атмосферу під час аварій.

Як видно з таблиці 2.1, коефіцієнти дифузії повітря для різних газів відрізняються несуттєво, а постійна Генрі для деяких газів відрізняється на два-три порядки, що, безумовно, вплине на кінетику поглинання. Для тих газів, які у воді дисоціюють на іони, коефіцієнт дифузії продуктів розкладання у воді повинен бути дещо вищим, оскільки він в основному визначається продуктами реакції. Для гідратованих молекул NH_3 , COCl_2 , HCl коефіцієнти дифузії у воді будуть нижчими за рахунок збільшення розмірів і маси молекул за рахунок гідратної оболонки. Надалі ми будемо

враховувати ці властивості при розрахунку потужності промивання небезпечних газів.

Таблиця 2.1. – Фізико-хімічні властивості небезпечних газів, що впливають на процес сорбції ($T=273\text{K}$, $P=10^5\text{ Па}$) [19]

Газ	$H \cdot 10^4$ [105]*, (моль·м ⁻³ ·Па ⁻¹)	$D_g \cdot 10^4$ [105], (м ² ·с ⁻¹)	Реакція газу з водою
NO ₂	1,2	0,119	$2\text{NO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}^+ + \text{NO}_3^- + \text{HNO}_2$
SO ₂	150	0,122	$\text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2\text{SO}_3$, $\text{H}_2\text{SO}_3 \rightleftharpoons \text{HSO}_3^- + \text{H}^+$
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	$\text{HCN} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NH}_4^+ + \text{HCOO}^-$
COCl ₂	1100	0,121	$\text{COCl}_2 + n \cdot \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{COCl}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$
HCl	1900	0,130	$\text{HCl} + n \cdot \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{HCl} \cdot n\text{H}_2\text{O}$
H ₂ S	10	0,127	$\text{H}_2\text{S} \xrightarrow{\text{H}_2\text{O}} \text{HS}^- + \text{H}^+$
Cl ₂	9,3	0,124	$\text{Cl}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{Cl}^- + \text{HClO}$

* - дані дещо відрізняються в різних джерелах залежно від методу визначення

Через поглинання газу та можливість створення рівноваги неможливо досягти повного відмивання, тому встановимо граничний ступінь очищення 0,9. Гранично допустимі концентрації хімічно небезпечних газів суттєво відрізняються (табл. 2.2), тому для аналізу будемо визначати вихідну концентрацію $C_g^0 = 1\text{ моль} \cdot \text{м}^{-3}$.

Швидкість поглинання хімічно небезпечного газу атмосферним аерозолем визначається різницею швидкості поглинання V_{des} і поглинання V_{abs} :

$$\frac{dC_g}{d\tau} = V_{\text{des}} - V_{\text{abs}}, \quad (2.1)$$

де C_g – концентрація газу в атмосфері; τ – час.

Таблиця 2.2. – Гранично небезпечні концентрації деяких небезпечних газів, що викидаються при НС [19]

Газ	NO ₂	SO ₂	HCl	HCN
C_g^0 , моль·м ⁻³	0,83	0,78	0,25	0,37
Газ	COCl ₂	H ₂ S	Cl ₂	NH ₃
C_g^0 , моль·м ⁻³	0,033	0,24	0,65	2,35

Відповідно до кроків 1-7, математичний вираз для швидкості поглинання виглядає наступним чином:

$$V_{\text{abs}} = V_{\text{col}} \cdot \alpha \cdot K_{\text{dif}} \quad \text{або} \quad V_{\text{abs}} = V_{\text{col}} \cdot \alpha \cdot K_r, \quad (2.2)$$

де V_{col} – швидкість поглинання молекул газу краплями води; α – коефіцієнт ймовірності поглинання молекул газу поверхнею краплі; K_{dif} – коефіцієнт швидкості дифузії газу усередині краплі. При можливості існування хімічної реакції між газом та рідиною в об'ємі краплі коефіцієнт K_{dif} замінюється на K_r – коефіцієнт дифузії молекул газу в краплі та швидкість хімічної реакції газу з рідиною.

Для вирішення рівнянь (2.1) розглянемо особливості кожного етапу нижче.

Квантове зіткнення молекул газу з поверхнею краплі визначається коефіцієнтом дифузії конкретного газу в повітрі та ймовірністю зіткнення молекул газу з поверхнею краплі. Ці параметри легко визначаються на основі положень молекулярно-кінетичної теорії, однак такий параметр, як розмір краплі аерозолі, має свої особливості. У нормальній атмосфері вода у вільному молекулярному стані практично відсутня. Вільні молекули води

або взаємодіють з іншими компонентами атмосфери, залежно від їх хімічної природи, або об'єднуються в групи води, які можна розглядати як високодисперсні аерозолі з розміром частинок до 1000 Å. В атмосфері ці частинки відповідають Число Кнудсена $Kn > 1$. Характеризуються частинками з активним броунівським рухом і практичною відсутністю процесу седиментації. Тому взаємодію газів з водними групами формально можна розглядати як взаємодію молекул газу між собою. Таким умовам відповідають безхмарні області нижньої тропосфери.

Щоб визначити швидкість, з якою токсичні гази фільтруються з атмосфери, нам потрібно розрахувати ймовірність або частоту зіткнень молекул газу з водоймами. Для цього можна використовувати стандартний розподіл Максвелла:

$$dP(v) = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{\frac{3}{2}} v^2 e^{-\frac{mv^2}{2kT}} dv, \quad (2.3)$$

де P – імовірність зіткнень молекул газів з водними кластерами; m – маса молекул; k – постійна Больцмана; T – температура газу; v – середня швидкість молекул газу.

Проте М. Смолюховський та А. Ейнштейн запропонували більш просту модель частоти зіткнень двох молекул газів, у якій коефіцієнт частоти зіткнень (k_{col}) визначається за допомогою коефіцієнтів дифузії:

$$k_{col}^k = 4\pi \cdot (R_g + R_k) \cdot (D_g + D_k), \quad (2.4)$$

де R_g , D_g – розмір молекули та коефіцієнт дифузії хімічно небезпечного газу в повітрі; R_k , D_k – розмір та коефіцієнт дифузії водяного кластера відповідно. Для молекул звичайно застосовується $R \approx \lambda$, де λ – довжина вільного пробігу молекул.

Коефіцієнти дифузії молекул газу або груп води (D_g, D_k) визначають із загального співвідношення:

$$D = D_0 \cdot \frac{P_0}{P} \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1,75}, \quad (2.5)$$

де D_0 – коефіцієнт дифузії за стандартних умов ($P_0 = 10^5$ Па; $T_0 = 273$ К); P, T – відповідно тиск та температура газу або води (кластера), при яких визначається коефіцієнт дифузії.

Якщо коефіцієнт дифузії певного газу за стандартних умов невідомий, можна використати квазіемпіричне рівняння Фуллера, Шетлера та Гіддінгса [106]:

$$D = \frac{0,986 \cdot 10^{-8} \cdot T^{1,75}}{P \cdot \left(v_{gk}^{1/3} + v_a^{1/3} \right)^2} \sqrt{\frac{1}{M_{gk}} + \frac{1}{M_a}}, \quad (2.6)$$

де v_{gk}, M_{gk} – молярний об'єм та молярна маса хімічно небезпечного газу або водного кластера; v_a, M_a – молярний об'єм та молярна маса повітря.

При розмірах крапель (R_{drop}) більше 1 мкм $Kn \rightarrow 0$. При таких розмірах зіткнення з молекулами газу істотно не впливають на рух крапель, і вони спливають під дією повітряних потоків. У цьому випадку взаємодію між газом і аерозолем можна розглядати як взаємодію молекули з нерухомою поверхнею краплі води. Ці умови відповідають $R_g \ll R_{drop}$ та $D_g \gg D_{drop}$, відповідно вираз (2.4) набуде вигляду:

$$k_{col}^{drop} = 4\pi \cdot R_{drop} \cdot D_g. \quad (2.7)$$

Це співвідношення справедливо для великих крапель диспергованого аерозолію.

В діапазоні розмірів крапель 0,1-1 мкм реалізується перехідний процес, і функція розподілу може бути розрахована шляхом розв'язання кінетичного рівняння Больцмана з деякими спрощеннями. Автори роботи [107] запропонували використовувати вирази для таких ситуацій:

$$k_{col}^m = \frac{4\pi \cdot D_g \cdot (R_g + R_k)}{1 + \lambda \cdot Kn}, \quad \text{де} \quad \lambda = \frac{1,33 + 0,71 / Kn}{1 + Kn}. \quad (2.8)$$

Частота зіткнень молекул газу із краплями аерозолію в певних умовах визначається використовуючи розглянуті вище коефіцієнти k_{col} :

$$V_{col} = k_{col} \cdot C_{drop} \cdot C_g, \quad (2.9)$$

де C_{drop} – концентрація водяних крапель у повітрі.

Концентрацію крапель води в одиниці об'єму атмосфери можна вважати постійною ($C_{drop} = \text{const}$) за умови, що краплі води лише поглинають газ і не згортаються між собою. Умови повної відсутності коагуляції в реальній атмосфері зазвичай неможливі, але напівпостійна середньооб'ємна концентрація кластерів води повністю відповідає атмосфері з постійними метеорологічними умовами або постійною інтенсивністю потоку води.

Однак у реальній атмосфері спрей є полідисперсним, тому необхідно ввести функцію розподілу краплі за розміром $f(R_{drop})$ у рівняння (2.9).

Раніше ми розглядали закономірність частоти взаємодії молекул газу з поверхнею крапель атмосферного аерозолію. Проте молекули газу, що зіткнулися з краплею, з імовірністю α (коефіцієнт акомодатії) проникають в об'єм через поверхневий шар товщиною $\Delta x \rightarrow 0$. Відповідно, швидкість

поглинання (адсорбції) молекул газу поверхнею V_{ades} буде визначатися наступним чином:

$$V_{\text{ads}} = V_{\text{col}} \cdot \alpha \quad (2.10)$$

Оскільки закон Генрі справедливий для процесу розчинення в атмосферних умовах, рівноважна швидкість утворення в поверхневому шарі краплі з (2.10) визначається як

$$V_{\text{ads}}^{\text{H}} = \frac{V_{\text{col}} \cdot \alpha}{4\pi \cdot H \cdot R_0 \cdot T} \quad (2.11)$$

де H – константа Генрі; R_0 – універсальна газова стала. У роботі [107] коефіцієнт α обирається з експериментальних даних у діапазоні $\alpha \approx 10^{-2}$ –1, що звужує область застосування моделі та негативно впливає на її адекватність. Тому нижче запропоновано метод розрахунку α .

Раніше зазначалося, що багато авторів при розгляді процесів поглинання не приділяють належної уваги питанню визначення коригувального коефіцієнта α . Кнудсен вперше розглянув процес взаємодії молекул газу з поверхнею і визначив міру ефективності енергообміну на межі розподілу «газ-поверхня» за коефіцієнтом акомодатії α . Коефіцієнт акомодатії показує частину молекул газу, поглинених поверхнею краплі, із загальної кількості молекул, які контактували з поверхнею краплі.

Чисельний розрахунок коефіцієнта акомодатії з використанням загальних молекулярних законів і рівняння Максвелла є досить складним завданням через невизначеність взаємодії молекул газу з молекулами поверхні краплі. Крім того, такі розрахунки проводяться без урахування фізико-хімічних властивостей поверхні краплі та закономірностей хімічної

взаємодії газу з рідиною. Тому на даному етапі існують два основних підходи до вирішення задачі визначення коефіцієнтів акомодатії.

Перший полягає в експериментальному визначенні α [108]. Цей метод враховує всі можливі типи фізико-хімічних взаємодій, однак дозволяє визначити коефіцієнт акомодатії лише для контакту конкретного газу з конкретною поверхнею за певних умов, крім того, результати визначення α різними дослідниками відрізняються. Незначно через відмінності в методиці проведення експерименту.

Другий підхід до визначення α базується на математичному програмуванні процесу адсорбції, розглянутому вище, а також у літературних джерелах [109, 110]. І хоча цей метод розрахунку α є найбільш точним, він має ряд недоліків для вирішення завдання оперативного очищення атмосфери від хімічно небезпечних газів, про які було сказано вище.

На цій основі запропоновано більш простий метод розрахунку, заснований на двох граничних умовах взаємодії вільної молекули газу з поверхнею води. При зіткненні з краплею молекули газу, кінетична енергія яких перевищує енергію зв'язку молекул води на поверхні краплі ($E_g > E_{d-d}$), розривають зв'язок H_2O-H_2O і проникають у поверхневий шар краплі. У випадку $E_g < E_{d-d}$ молекулярний шар поверхні не руйнується, і при швидкостях зіткнення, що відповідають швидкості польоту вільної молекули газу, рідина поводить себе як нестислива і повністю пружна. Оскільки маса краплі набагато більша за масу молекули газу ($m_g \ll m_d$), то молекула газу після зіткнення повертається з тією ж енергією, що й до зіткнення. Однак на відстанях, менших за радіус Дебая, між поверхневими молекулами краплі та молекулою газу існують сили хімічної взаємодії E_{g-d} , які витягують молекулу газу на поверхню. За умов $E_g \leq E_{g-d}$ молекула газу адсорбується на поверхні краплі. Враховуючи той факт, що енергія молекули небезпечного газу в атмосфері розподіляється за законом Максвелла-Больцмана ($f(E_g)$), виходячи

з міркувань, описаних вище, ми запропонували наступну формулу для визначення коригувального коефіцієнта:

$$\alpha = 1 - \int_{E_{g-d}}^{E_{d-d}} f(E_g, T_g) dE_g. \quad (2.12)$$

Результати розрахунку адсорбції деяких газів на поверхні крапель води за моделлю (2.12) наведені в таблиці. 2.3. Для порівняння в таблиці наведено літературні дані, отримані експериментально та за допомогою моделей KM GAP та MD.

Таблиця 2.3. – Коефіцієнти акомодатії небезпечних газів з водою
($T=273K$, $E_{d-d}=0,12e$)

Контактуючий газ	Значення α по моделі (2.12)	Значення α з літературних джерел	Відносна похибка, %
H ₂ O	1	0,99 [109]	1,0
CH ₄	0,11	0,12 [109]	8,3
NH ₃	0,58	0,61 [110]	3,3
NO ₂	0,72	0,75 [110]	4,0
SO ₂	0,75	0,81 [111]	7,4
HCl	0,38	0,43 [109]	9,3

Як видно з таблиці 2.3, розрахунки по моделі (2.12) трохи розходяться з літературними даними. У випадку пари H₂O, газів NH₃, NO₂ відносна похибка сягає до 4%; для CH₄, SO₂, HCl – від 7,4 % до 9,3 %. Тому для завдань масштабного моделювання атмосферних процесів і довгострокового прогнозування метеорологічної ситуації доцільніше використовувати розрахункові комплекси KM GAP і MD. Водночас при вирішенні завдань оперативного очищення атмосфери від хімічно небезпечних забруднень у разі аварій, коли подібне значення похибок не є критичним, а час розрахунку

та обмеження в первинних даних стають більш значними, доцільніше використовувати запропоновану модель (2.12).

Запропонована в роботі залежність для оцінки впливу швидкості дифузії газу на об'єм краплі була неодноразово перевірена іншими дослідниками [111] і показала високу узгодженість з експериментальними даними. Відповідно до [111] коефіцієнт, що враховує швидкість дифузії молекул газу в об'ємі краплі, визначається як

$$K_{d,a} = \frac{4N \cdot R_0 \cdot T}{\bar{v}_g} \sqrt{\frac{D_a}{\pi \cdot \tau}}, \quad (2.13)$$

де \bar{v}_g – середня швидкість руху молекул газу в повітрі, $\bar{v}_g = \sqrt{(8R_0T)/(\pi M_g)}$; D_a – коефіцієнт дифузії газу в рідині; τ – характерний час процесу поглинання; M_g – молярна маса поглиненого газу.

Але слід враховувати, що вираз (2.13) справедливий лише для газів, які не дисоціюють і не вступають у хімічну реакцію з крапельною рідиною.

За аналогією з (2.13) можна записати вираз, що визначає дифузію продуктів реакції:

$$K_{d,a}^r = \frac{4N \cdot R_0 \cdot T}{\bar{v}_g^r} \sqrt{\frac{D_a^r}{\pi \cdot \tau}}, \quad (2.14)$$

де \bar{v}_g^r – середня швидкість молекул продукту реакції в повітрі; D_a^r – коефіцієнт дифузії продукту реакції в рідині.

Вплив паралельного перебігу в об'ємі краплі двох процесів: дифузії газу та хімічної реакції молекул газу з молекулами води враховується коефіцієнтом K_r (2,2), який визначається як [104, 111]

$$K_r = \frac{4H \cdot R_0 \cdot T}{\bar{v}_g} \sqrt{D_a \cdot \nu}, \quad (2.15)$$

де ν – константа швидкості хімічної реакції.

Враховуючи паралельне протікання процесів адсорбції та десорбції з поверхні краплі молекул газу, виведено рівняння для V_{des} , яке визначається вмістом газу в поверхневому шарі та парціальним тиском газу продуктів реакції в атмосфері (P_g):

$$V_{\text{des}} = \frac{4\pi \cdot R_0 \cdot T \cdot C_g \cdot V_{\text{col}} \cdot \alpha}{P_g}. \quad (2.16)$$

У разі хімічної реакції, що протікає в об'ємі краплі (за винятком дисоціації, оскільки іони молекул, що розпалися під час підрахунку, створюють молекули вихідного газу), відбувається поглинання продуктів реакції з поверхні краплі. Як показано вище (2.16), швидкість поглинання продуктів реакції визначається їх вмістом у поверхневому шарі, який змінюється відповідно до швидкості їх утворення та дифузії до поверхні краплі:

$$V_{\text{des}}^r = \frac{4\pi \cdot R_0 \cdot T \cdot C_g^r \cdot V_{\text{abs}} \cdot \alpha \cdot (K_r + K_{\text{d.a}}^r)}{P_g^r}, \quad (2.17)$$

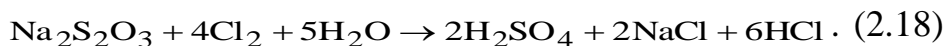
де C_g^r – концентрація продуктів реакції в повітрі; P_g^r – порціальний тиск продуктів реакції в повітрі.

На відміну від аміаку, хлор (Cl_2) і фосген (COCl_2) мають надзвичайно низьку розчинність у воді.

Низька розчинність хлору і фосгену свідчить про малу інтенсивність осадження цих газів водними аерозолями. Тому, щоб збільшити швидкість

очищення атмосфери, необхідно додатково приймати нейтралізуючі речовини.

Найбільш активним нейтралізатором хлору є тіосульфат натрію:



З рівняння (2.18) можна визначити, що для нейтралізації 1 т хлору необхідно близько 0,5 т $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$. Як видно з (2.18), реакція відбувається у водних розчинах. Однак тіосульфат натрію легкозаймистий і вибухонебезпечний.

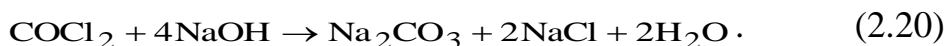
Ефективним нейтралізатором хлору є гідроксид натрію:



Для нейтралізації 1 т хлору необхідно 1,2 т NaOH . Гідроксид натрію добре розчинний у воді, тому в практиці дегазації зазвичай використовують водні розчини. Як видно з (2.19), при нейтралізації хлору лугом додатково утворюються солі, які розкладаються на гігроскопічні кристали і воду.

Не менш небезпечною речовиною є фосген (COCl_2), який викидається в атмосферу під час техногенних аварій (особливо при великих пожежах). У спеціальній літературі фосген називають «дихлорангідридом вугільної кислоти». Фосгену в природі не існує. Він став поширеним у хімічній промисловості, де використовується як проміжний продукт у виробництві, зокрема, фарб, пестицидів, фармацевтичних препаратів, полімерів, смол і затверджувачів. Річний видобуток становить близько 5 мільйонів тонн. Фосген утворюється при термічному розкладанні або фотоокисленні хлорованих розчинників, а також при горінні полівінілхлориду (ПВХ).

Незважаючи на те, що фосген слабо розчиняється у воді, він, як і хлор, активно нейтралізується гідроксидом натрію:



Із рівняння реакції (2.20) можна визначити, що для нейтралізації 1 т фосгену необхідно 1,6 т натрієвого лугу або 16 т його 10%-го водяного розчину.

У зв'язку з низькою щільністю осадження водними аерозолями газоподібного хлору рекомендується використовувати розчинні добавки гідроксиду натрію. Водні розчини NaOH здатні до хімічної нейтралізації хлору та фосгену, що, згідно з досліджуваною моделлю поглинання, призведе до значного збільшення інтенсивності осадження цих небезпечних газів.

2.1.3. Розробка математичної моделі прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів

Для моделювання процесів дифузії небезпечної хімічної речовини у повітрі використовувалися методи теорії диференціальних рівнянь у частинних похідних параболічного типу. Такі процеси вже добре описані в роботах [96, 97].

$$\frac{\partial q}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 q}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 q}{\partial z^2} \right) - v_x \frac{\partial q}{\partial x} - v_y \frac{\partial q}{\partial y} - v_z \frac{\partial q}{\partial z} + E \delta(x) \delta(y) \delta(z - z_0), \quad (2.21)$$

де E – інтенсивність викиду речовини, кг/с, що відбувається у точці $(0, 0, z_0)$, S – інтенсивність осадження НХР водяними завісами; $q(x, y, z, t)$ – концентрація НХР в повітрі, кг/м³; D – коефіцієнти турбулентної дифузії в горизонтальному і вертикальному напрямках; v_x, v_y – горизонтальні складові вектору, що визначає напрямок і швидкість вітру, м/с, v_z – вертикальна

складова швидкості вітру, обумовлена категорією стійкості атмосфери і густиною НХР.

На поверхні землі буде мати місце крайова умова другого роду:

$$\left. \frac{\partial q}{\partial z} \right|_{z=0} = 0, \quad (2.22)$$

а початкова умова

$$q(x, y, z, 0) = 0 \quad (2.23)$$

відповідає відсутності речовини у повітрі перед початком викиду [20].

При сталій величині викиду E розв'язок задачі (2.21)–(2.23) має вигляд

$$q_1(x, y, z, \tau) = \frac{E}{8\pi^{3/2}D^{3/2}} \cdot \int_0^\tau \frac{1}{(\tau-t)^{3/2}} \times \\ \times \exp\left[-\frac{(x-v_x(\tau-t))^2 + (y-v_y(\tau-t))^2}{4D(\tau-t)}\right] \times \\ \times \left\{ \exp\left[-\frac{(z-v_z(\tau-t)-z_0)^2}{4D(\tau-t)}\right] + \exp\left[-\frac{(z-v_z(\tau-t)+z_0)^2}{4D(\tau-t)}\right] \right\} dt, \quad (2.24)$$

З метою спрощення математичного опису запропоновано розглядати процес розповсюдження та осадження небезпечних газів в атмосфері як ланцюг поетапних простих процесів (рис. 2.3) [24].

На першій стадії моделюється процес вільного розповсюдження газу в атмосфері після його витоку із технологічного апарату (2.21)–(2.23). Визначаючими факторами при цьому є коефіцієнти дифузії в горизонтальному і вертикальному напрямках; горизонтальні складові вектору, що визначає напрямок і швидкість вітру; вертикальна складова швидкості вітру, обумовлена категорією стійкості атмосфери і густиною НХР.

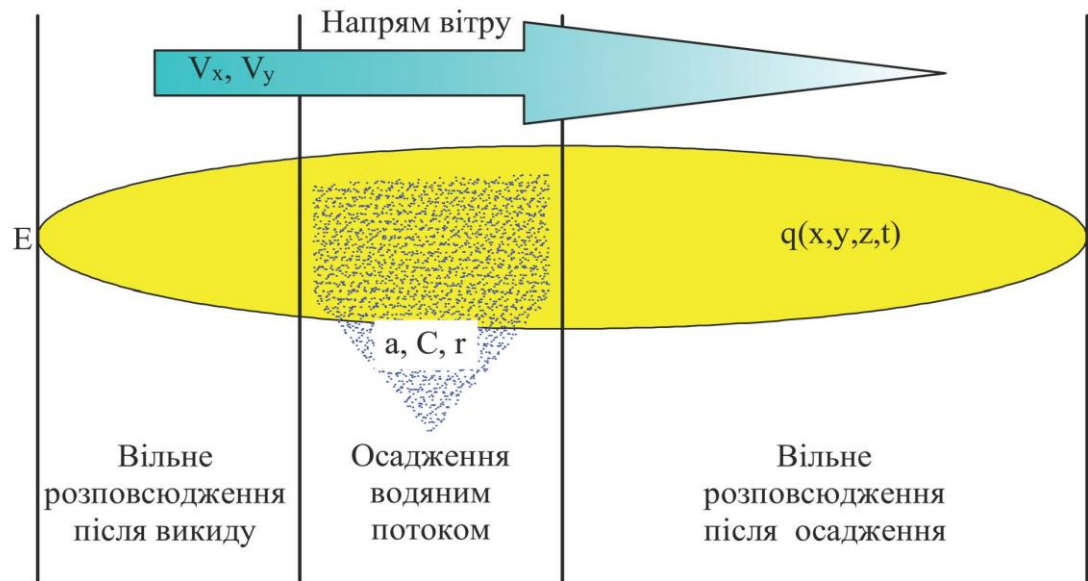


Рис. 2.3. Схема моделювання процесу розповсюдження небезпечного газу з активним осадженням

Отримані результати розрахунку на границі першої стадії є вхідними параметрами моделювання другої стадії.

На другій стадії (рис. 2.3) відбувається осадження з атмосфери небезпечного газу водним аерозолем, що подається із стаціонарних або пересувних пристроїв. При цьому приймається умова, що параметри водного аерозолі по всій площі вимивання є однакові. На інтенсивність вимивання небезпечного газу з атмосфери буде впливати коефіцієнт акомодатії газу на поверхні рідини; об'ємна концентрація крапель води; середній радіус крапель води у струмені; постійна Генрі (хімічний склад небезпечного газу); температура.

Припустимо, що в смугі $x_{n1} \leq x \leq x_{n2}$ відбувається активне осадження НХР. Перенесемо початок координат у точку $(x_{n1}, 0, 0)$.

Швидкість осадження НХР можна представити у вигляді [9]

$$S = \beta q(x, y, z, \tau), \quad (2.25)$$

де

$$\beta = \frac{\alpha D C r}{H R_0 T}.$$

де α – коефіцієнт акомодатії газу на поверхні рідини; C – об’ємна концентрація крапель води, м^{-3} ; r – середній радіус крапель води у струмені, м ; H – постійна Генрі, $\text{моль}/(\text{Па} \cdot \text{м}^3)$; R_0 – універсальна газова стала, $\text{Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$; T – температура, К .

Тоді рівняння дифузії в області активного осадження набуде вигляду

$$\frac{\partial q}{\partial \tau} = D \left(\frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 q}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 q}{\partial z^2} \right) - v_x \frac{\partial q}{\partial x} - v_y \frac{\partial q}{\partial y} - v_z \frac{\partial q}{\partial z} - \beta q(x, y, z, \tau) \quad (2.26)$$

з початковою умовою

$$q(x, y, z, 0) = 0, \quad (2.27)$$

крайовою умовою другого роду на поверхні землі

$$\left. \frac{\partial q}{\partial z} \right|_{z=0} = 0 \quad (2.28)$$

і крайовою умовою першого роду на межі, де починається осадження:

$$q(0, y, z, \tau) = q_1(x_1, y, z, \tau), \quad (2.29)$$

де q_1 – концентрація речовини (2.24), отримана як розв’язок задачі (2.21)-(2.23) [27].

В задачі (2.25)-(2.28) зробимо заміну

$$q(x, y, z, \tau) = \exp(A_1 x + A_2 y + A_3 z + B \tau) u(x, y, z, \tau), \quad (2.30)$$

де $A_1 = \frac{v_x}{2D}$; $A_2 = \frac{v_y}{2D}$; $A_3 = \frac{v_z}{2D}$; $B = -\beta - \frac{1}{4D}(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)$. Тоді рівняння (2.23) перетворюється на

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = D \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right). \quad (2.31)$$

Початкова умова залишається незмінною

$$u(x, y, z, \tau) = 0, \quad (2.32)$$

а крайові набувають вигляду

$$u(0, y, z, \tau) = q_1(x_1, y, z, \tau) \exp(-A_2 y - A_3 z - B\tau); \quad (2.33)$$

$$\left(A_3 u + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \Big|_{z=0} = 0. \quad (2.34)$$

Розв'язок крайової задачі (2.30)-(2.33) має вигляд [17]

$$u = D \int_0^\tau dt \int_{-\infty}^{\infty} d\eta \int_0^\infty d\zeta q_1(x_1, \eta, \zeta, t) \exp(-A_2 \eta - A_3 \zeta - Bt) \frac{\partial G}{\partial \xi}(x, y, z, \xi, \eta, \zeta, \tau - t) \Big|_{\xi=0}, \quad (2.35)$$

де G – функція Гріна задачі (2.30)-(2.33):

$$G(x, y, z, \xi, \eta, \zeta, \tau) = \frac{1}{8(\pi D \tau)^{3/2}} \left\{ \exp\left[-\frac{(x - \xi)^2}{4D\tau}\right] - \exp\left[-\frac{(x + \xi)^2}{4D\tau}\right] \right\} \times \\ \times \left\{ \exp\left[-\frac{(y - \eta)^2}{4D\tau}\right] \right\} \times \left\{ \exp\left[-\frac{(z - \zeta)^2}{4D\tau}\right] + \exp\left[-\frac{(z + \zeta)^2}{4D\tau}\right] + \right.$$

$$+ 2A_3 \sqrt{\pi D \tau} \exp[k^2 D \tau - A_3(z + \zeta)] \operatorname{erfc}\left(\frac{z + \zeta}{2\sqrt{D\tau}} - A_3 \sqrt{D\tau}\right) \}. \quad (2.36)$$

Тоді концентрація НХР в області активного осадження буде визначатися виразами (2.30), (2.35), (2.36) [19].

За смугою осадження ($x > x_{n2}$) рівняння дифузії має вигляд

$$\frac{\partial q}{\partial \tau} = D \left(\frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 q}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 q}{\partial z^2} \right) - v_x \frac{\partial q}{\partial x} - v_y \frac{\partial q}{\partial y} - v_z \frac{\partial q}{\partial z}. \quad (2.37)$$

Переносячи початок координат у точку $(x_2, 0, 0)$, запишемо крайову умову на межі зі смугою активного осадження у вигляді

$$q(0, y, z, \tau) = q_2(x_2 - x_1, y, z, \tau), \quad (2.38)$$

де q_2 – концентрація речовини, отримана з виразів (2.30), (2.35), (2.36).
Крайова умова на поверхні землі і початкова умова залишаються у вигляді (2.22) і (2.23) відповідно. Тоді розв'язок задачі (2.37), (2.38), (2.22), (2.23) буде мати вигляд аналогічний (2.30), (2.35), (2.36), де покладено $\beta = 0$ [27]:

$$q(x, y, z, \tau) = \exp(M_1 x + M_2 y + M_3 z + N \tau) w(x, y, z, \tau), \quad (2.39)$$

$$\text{де } M_1 = \frac{v_x}{2D}; \quad M_2 = \frac{v_y}{2D}; \quad M_3 = \frac{v_z}{2D}; \quad N = -\frac{1}{4D} (v_x^2 + v_y^2 + v_z^2);$$

$$w = D \int_0^\tau dt \int_{-\infty}^{\infty} d\eta \int_0^\infty d\zeta q_2(x_1, \eta, \zeta, t) \exp(-M_2 \eta - M_3 \zeta - Bt) \times \\ \times \left. \frac{\partial G}{\partial \xi}(x, y, z, \xi, \eta, \zeta, \tau - t) \right|_{\xi=0}; \quad (2.40)$$

$$\begin{aligned}
G(x, y, z, \xi, \eta, \zeta, \tau) = & \frac{1}{8(\pi D\tau)^{3/2}} \left\{ \exp\left[-\frac{(x-\xi)^2}{4D\tau}\right] - \exp\left[-\frac{(x+\xi)^2}{4D\tau}\right] \right\} \times \\
& \times \left\{ \exp\left[-\frac{(y-\eta)^2}{4D\tau}\right] \right\} \times \left\{ \exp\left[-\frac{(z-\zeta)^2}{4D\tau}\right] + \exp\left[-\frac{(z+\zeta)^2}{4D\tau}\right] + \right. \\
& \left. + 2M_3\sqrt{\pi D\tau} \exp\left[k^2 D\tau - M_3(z+\zeta)\right] \operatorname{erfc}\left(\frac{z+\zeta}{2\sqrt{D\tau}} - M_3\sqrt{D\tau}\right) \right\}. \quad (2.41)
\end{aligned}$$

Отримана система з рівнянь (2.24), (2.30) та (2.39) дозволяє визначити межі зон забруднення небезпечними хімічними речовинами при активному їх осадженні розпиленими струменями [29].

Наявність зони, в якій відбувається осадження небезпечної хімічної речовини призводить до появи в рівняння дифузії доданка, який містить коефіцієнт осадження β . Оскільки область осадження займає не всю площину, то цей коефіцієнт не є сталим, а змінюється (неперервно або стрибком) в залежності від координат. Внаслідок цього аналітичне розв'язання диференціального рівняння є ускладненим і доцільно скористатися чисельними методами його розв'язання, зокрема методом скінчених різниць.

2.1.4. Розробка способу розв'язання математичної моделі прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів

Будемо вважати, що напрямок вітру співпадає з напрямком вісі ОХ. Тоді рівняння дифузії набуде вигляду

$$\frac{\partial q}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 q}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 q}{\partial z^2} \right) - v_x \frac{\partial q}{\partial x} + E\delta(x)\delta(y)\delta(z) - \beta q(x, y, z, \tau). \quad (2.42)$$

де $\delta(x)$, $\delta(y)$, $\delta(z)$ – δ -функції; E – інтенсивність викиду, кг/с; $q(x,y,z,t)$ – концентрація газу в повітрі, кг/м³; D – коефіцієнти дифузії в горизонтальному і вертикальному напрямках; v_x – горизонтальна складова вектору, що визначає напрямок і швидкість вітру, м/с; β – інтенсивність процесу сорбції, с⁻¹

Розглянемо спочатку рівняння дифузії без доданка, який описує осадження хімічної речовини:

$$\frac{\partial q}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 q}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 q}{\partial z^2} \right) - v_x \frac{\partial q}{\partial x} + E \delta(x) \delta(y) \delta(z). \quad (2.43)$$

Розв'язуючи його при початковій умові

$$q(x, y, z, 0) = 0 \quad (2.44)$$

і крайовій умові

$$\left. \frac{\partial q}{\partial z} \right|_{z=0} = 0, \quad (2.45)$$

отримаємо

$$q(x, y, z, t) = \frac{E}{4(\pi a)^{3/2}} \cdot \int_0^{\tau} \frac{1}{t^{3/2}} \exp \left[-\frac{(x - v_x t)^2 + y^2 + z^2}{4at} \right] dt. \quad (2.46)$$

Виконуючи граничний перехід, отримаємо стаціонарний розподіл концентрацій речовини у повітрі [21]

$$q_{\infty}(x, y, z) = \frac{E}{4(\pi a)^{3/2}} \cdot \int_0^{\infty} \frac{1}{t^{3/2}} \exp \left[-\frac{(x - v_x t)^2 + y^2 + z^2}{4at} \right] dt. \quad (2.47)$$

Розв'язок (2.47) дозволяє визначити область у вигляді паралелепіпеда

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

за межами якої концентрація хімічної речовини не буде перевищувати заданої величини, наприклад, 0,1 ПДК, що для аміаку складає 2 мг/м³ [21].

Будемо розглядати рівняння (2.47) у скінченному об'ємі Ω , доповнивши початкову і крайову умови (2.44), (2.45) крайовими умовами першого роду на гранях паралелепіпеда

$$q(a_x, y, z, \tau) = q(b_x, y, z, \tau) = 0;$$

$$q(x, a_y, z, \tau) = q(x, b_y, z, \tau) = 0;$$

$$q(x, y, b_z, \tau) = 0.$$

Побудуємо регулярну тривимірну сітку з кроком h в області Ω таким чином, щоб один із її вузлів співпадав з точкою викиду (початком координат) (рис. 2.4).

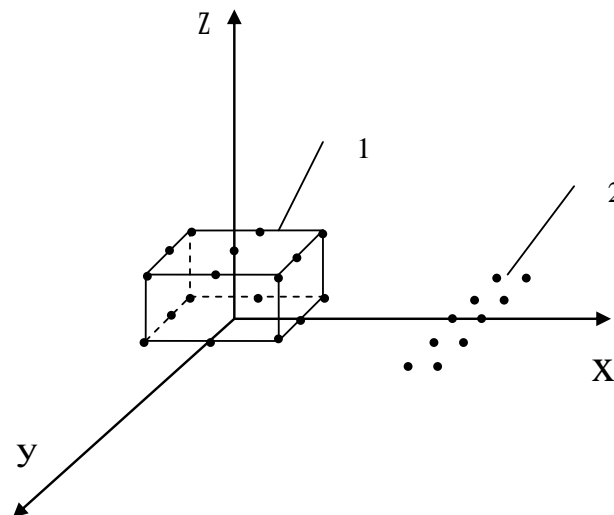


Рис. 2.4. Побудова регулярної сітки для області розповсюдження хімічної речовини: 1 – паралелепіпед із точок, сусідніх з точкою викиду; 2 – множина вузлів сітки, в яких відбувається осадження хімічної речовини

У вузлах сітки, що оточують точку викиду (рис. 2.4) приймемо значення концентрації у вигляді:

$$q(x, y, z, \tau) = q_{\infty}(x, y, z).$$

В усіх внутрішніх вузлах сітки, за виключенням точки викиду і оточуючих її вузлів замінимо диференціальне рівняння (2.42) рівнянням у скінчених різницях. Для цього апроксимуємо частинні похідні виразами

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

де $\Delta \tau$ – крок на вісі часу.

$$\frac{\partial q}{\partial x} \approx \frac{\Delta_x q}{h} = \frac{q(x_{i+1}, y_j, z_k, t_m) - q(x_i, y_j, z_k, t_m)}{h};$$

$$\frac{\partial^2 q}{\partial x^2} \approx \frac{\Delta_{xx} q}{h^2} = \frac{q(x_{i+1}, y_j, z_k, t_m) + q(x_{i-1}, y_j, z_k, t_m) - 2q(x_i, y_j, z_k, t_m)}{h^2};$$

$$\frac{\partial q}{\partial y} \approx \frac{\Delta_y q}{h} = \frac{q(x_i, y_{j+1}, z_k, t_m) - q(x_i, y_j, z_k, t_m)}{h};$$

$$\frac{\partial^2 q}{\partial y^2} \approx \frac{\Delta_{yy} q}{h^2} = \frac{q(x_i, y_{j+1}, z_k, t_m) + q(x_i, y_{j-1}, z_k, t_m) - 2q(x_i, y_j, z_k, t_m)}{h^2};$$

$$\frac{\partial q}{\partial z} \approx \frac{\Delta_z q}{h} = \frac{q(x_i, y_j, z_{k+1}, t_m) - q(x_i, y_j, z_k, t_m)}{h};$$

$$\frac{\partial^2 q}{\partial z^2} \approx \frac{\Delta_{zz} q}{h^2} = \frac{q(x_i, y_j, z_{k+1}, t_m) + q(x_i, y_j, z_{k-1}, t_m) - 2q(x_i, y_j, z_k, t_m)}{h^2}.$$

Тоді рівняння (2.42) у скінчених різницях набуде вигляду [21]

$$\frac{\Delta_{\tau}q}{\Delta\tau} = a \left(\frac{\Delta_{xx}q}{h^2} + \frac{\Delta_{yy}q}{h^2} + \frac{\Delta_{zz}q}{h^2} \right) - v_x \frac{\Delta_x q}{h} - \beta(x, y, z)q, \quad (2.48)$$

де (2.48) впливає, що приріст (за часом) концентрації у внутрішній точці (x_i, y_j, z_k) області описується виразом

$$\Delta_{\tau}q = a \frac{\Delta\tau}{h^2} (\Delta_{xx}q + \Delta_{yy}q + \Delta_{zz}q) - v_x \frac{\Delta\tau}{h} \Delta_x q - \beta(x, y, z)q\Delta\tau, \quad (2.49)$$

що дозволяє обчислити концентрації в точках сітки в наступний момент часу

$$q(x_i, y_j, z_k, \tau + \Delta\tau) = q(x_i, y_j, z_k, \tau) + \Delta_{\tau}q. \quad (2.50)$$

Таким чином, формули (2.49), (2.50) дозволяють знайти значення концентрацій хімічної речовини у вузлах сітки у довільний момент часу τ . Відзначимо, що для стійкої збіжності ітераційного процесу (2.49), (2.50) необхідно, щоб кроки по вісі часу і координат задовольняли умові Куранта-Фрідрікса-Леві:

$$\Delta\tau \leq \frac{h^2}{6a}.$$

Розв'язання рівнянь проводилося чисельними методами.

Для цього було використано математичний пакет MAPLE (Канада), версія 18. При моделюванні описувалась умова сорбції газу в атмосфері дрібнодисперсним потоком з дисперсністю 1 мм та інтенсивністю подачі рідини 2 л/с. Зона сорбції шириною 5 м знаходиться на відстані 10 м від

осередку викиду газу. Процес сорбції моделюється при умові швидкості повітря 5 м/с (рис. 2.5).

Як видно з рис. 2.5 моделюється умова безперервного викиду газу із точкового джерела з постійною інтенсивністю. Розрахунки показали, що при інтенсивності потоку більше 2 л/с та інтенсивності викиду газу 0,1 кг/с концентрація небезпечного газу практично падає до 0.

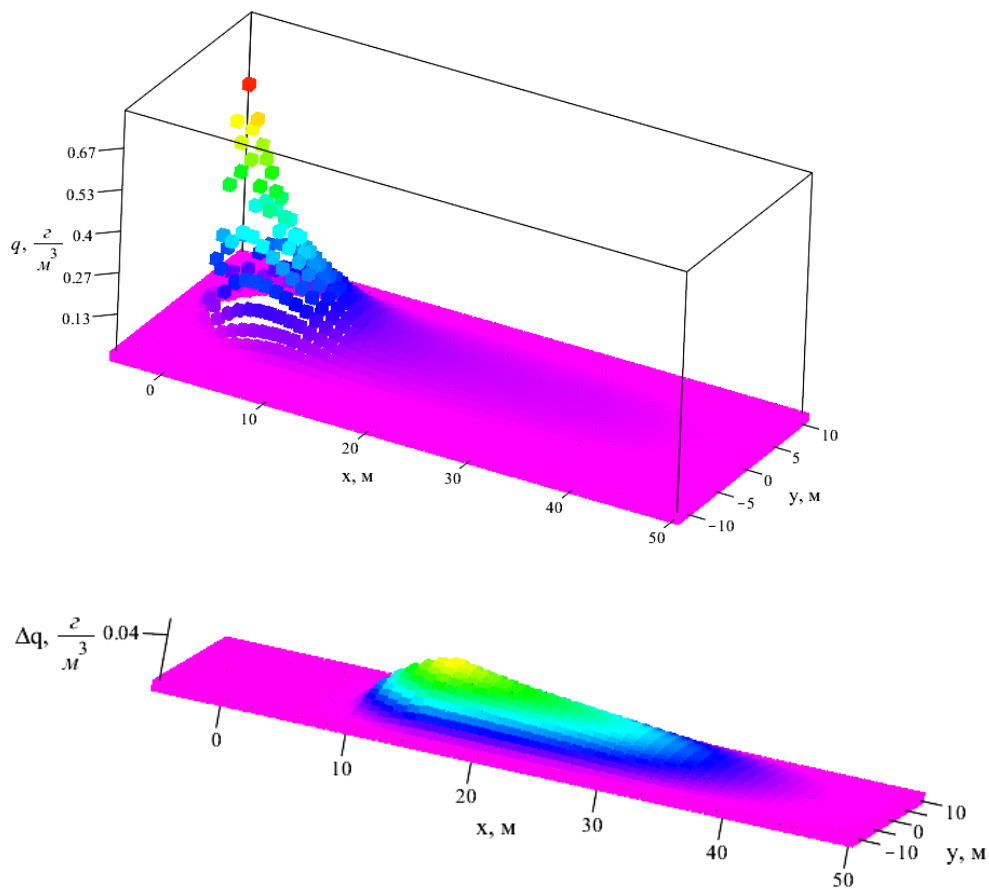


Рис. 2.5. Результати моделювання розповсюдження аміаку без осадження та при осадженні дрібнодисперсними струменями (а) та просторовий розподіл різниці концентрацій газу у повітрі без осадження та з осадженням (б).

Для оцінки ефективності процесу сорбції проведено розрахунок відношення зміни концентрації газу у відповідності до початкової концентрації (рис. 2.6).

Рис. 2.6 показує, що осадження аміаку дрібнодисперсним струменем знижує концентрацію небезпечного газу на 30%. При цьому через 10 секунд після початку подачі дрібнодисперсного потоку прохід газу крізь водяну стіну припиняється, а той газ, що вже пройшов розсіюється до безпечних концентрацій.

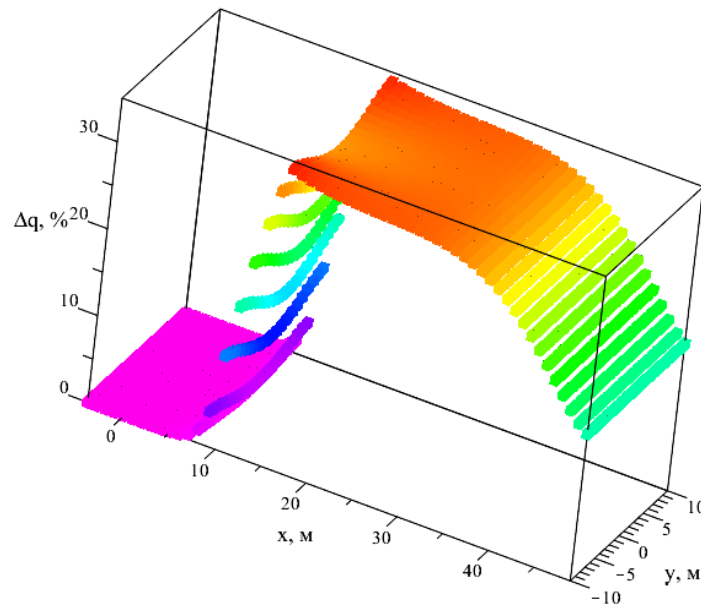


Рис. 2.6. Просторовий розподіл ефективності сорбції аміаку дрібнодисперсним потоком.

Таким чином, розроблена математична модель розповсюдження небезпечного газу в атмосфері при його активному осадженні водними аерозолями дозволяє підвищити точність розрахунків розподілу концентрації газу в атмосфері при роботі стаціонарних та пересувних систем аерозольного осадження. Розроблена математична модель є системою із трьох рівнянь. Перше рівняння описує процес вільного розповсюдження газу після викиду із технологічного обладнання. Друге рівняння описує процес осадження газу із атмосфері дрібнодисперсним рідинним потоком з різною інтенсивністю. Третє рівняння описує процес вільного розсіювання газу в атмосфері після осадження. За допомогою комп'ютерного моделювання перевірена працездатність розробленою математичної моделі. Використання при моделюванні методу скінчених різниць дозволяє отримувати числові рішення

просторового розподілу концентрації газу при його осадженні струменем довільної інтенсивності та форми. Запропонований метод математичного опису процесу сорбції небезпечних газів дозволяє обирати довільну кількість та просторове розміщення вузлових точок, які задовольняють умові Куранта-Фрідрікса-Леві.

2.2. Розробка управляючого алгоритму методики прогнозування хімічної обстановки при аваріях з викидом небезпечних газів

Алгоритм прогнозування розмірів зони ураження при викиді НХР за допомогою рівнянь (2.24), (2.30) та (2.39) представлено на рис. 2.7 [17].

При залученні оперативно-рятувальних підрозділів на локалізацію НС визначаються такі параметри осадження, як інтенсивність подачі рідини, її дисперсність та можливі розміри зони осадження. При цьому прогнозування розмірів зони ураження проводиться за системою із трьох рівнянь (2.24), (2.30) та (2.39). У випадку відсутності достатньої кількості сил та засобів прогнозування проводиться по моделі (2.24).

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

Алгоритм (рис. 2.7) складається з 9 блоків, розміщених на трьох ієрархічних рівнях, зв'язаних прямими зв'язками. На першому ієрархічному рівні знаходиться 4 блоки. На першому етапі відбувається отримання та систематизація інформації про аварію від встановлених засобів автоматичної сигналізації, від чергової на об'єкті особи або від групи хімічної розвідки. Для проведення якісного прогнозування зон хімічного забруднення необхідно отримати точну інформацію про основні метеорологічні параметри від державного чи регіонального органу гідрометеослужби. Також керівник

ліквідації надзвичайної ситуації повинен володіти даними про наявні у розпорядження сили та засоби цивільного захисту [18].

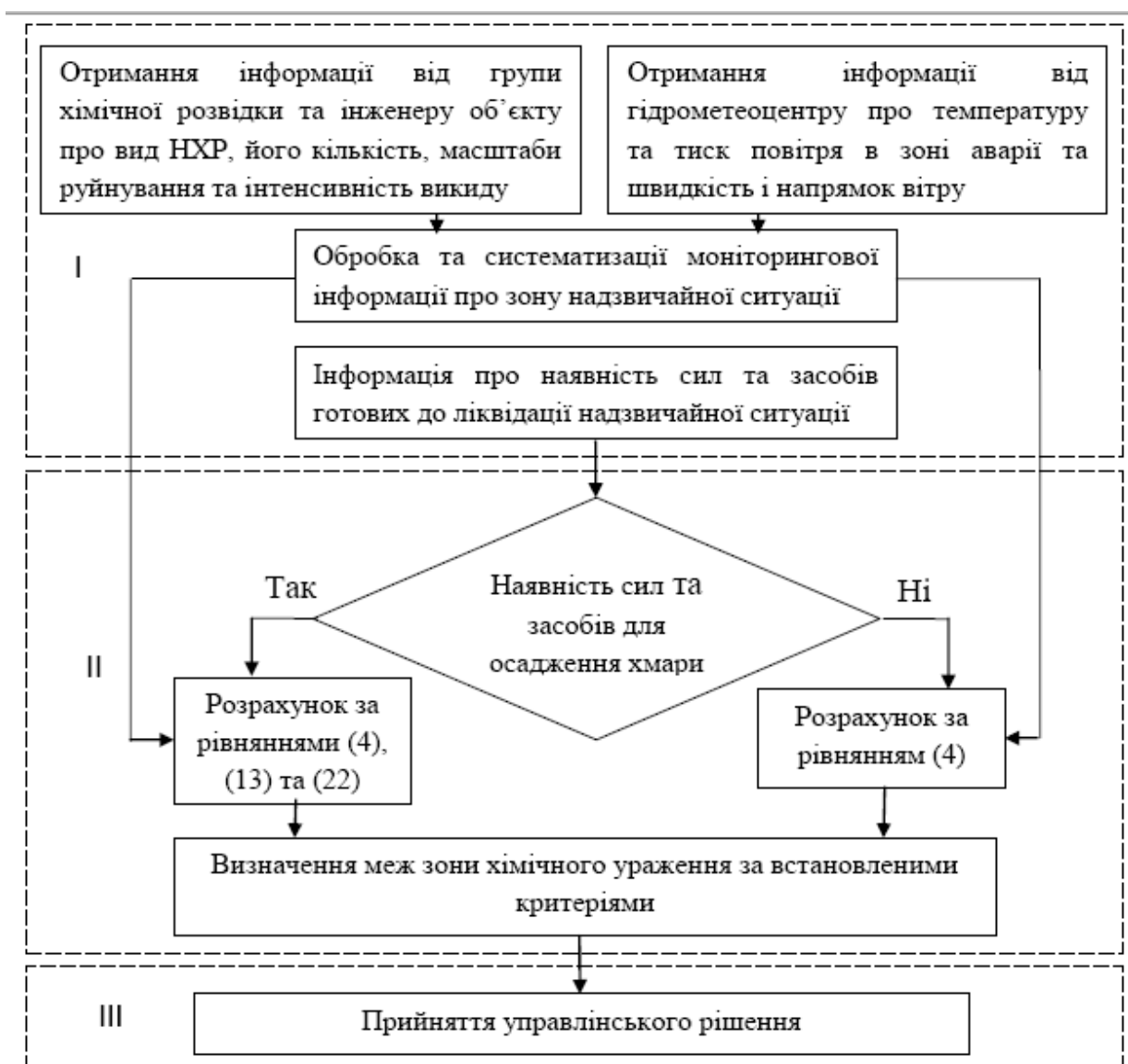


Рис. 2.7. Керуючий алгоритм методики прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів

На другому етапі відбувається розрахунок розмірів зон хімічного забруднення. Для цього керівник ліквідації НС повинен визначитись з критерієм безпеки. При НС такого класу в якості критерію безпеки зазвичай обирають гранично допустиму концентрацію (ГДК) НХР. Після оцінки наявних резервів оперативно-рятувальних сил, керівник ліквідації НС визначається з можливістю проведення осадження хмари НХР.

Одним з недоліків отриманої моделі є припущення, що осадження хмари НХР відбувається по всій глибині та висоті хмари. Тобто граничними умовами використання даної моделі є технічні можливості оперативно-рятувальних підрозділів для подавання розпиленої води. Технічні можливості по дальності подачі дрібнодисперсного струменю для лафетних стволів становить до 40 м в залежності від модифікації. Тобто при використанні двох лафетних стволів на протилежних сторонах хмари глибина зони осадження може складати до 80 м. Якщо розглядати технічні можливості по висоті подачі розпиленого струменю, то необхідно брати до уваги два варіанти подачі струменю – наземний та з використанням підймачів. Наземний спосіб подачі розпиленого струменю здатен забезпечити висоту до 20 м. Використання механічних підймачів дозволяє збільшити висоту подачі струменю до 50 м. Тобто розміри зони хімічного ураження для можливості використання розробленої моделі для прогнозування її розмірів повинні знаходитись в межах по ширині до 80 м та висоті до 50 м в залежності від технічної можливості оперативно-рятувальних підрозділів. Таким чином, використання даної моделі доцільне коли осадження проводиться на початковій стадії аварії або поблизу зони викиду. Це відповідає дійсності так як саме поряд із джерелом викиду оперативно-рятувальні підрозділи проводять роботи по рятуванню постраждалих та локалізації викиду НХР.

Розроблений алгоритм прогнозування зони хімічного ураження при активному осадженні небезпечної хімічної речовини розпиленими струменями базується на послідовності трьох блоків – моніторингу зони надзвичайної ситуації, прогнозування наслідків надзвичайної ситуації та прийняття управлінського рішення. Моніторинг зони надзвичайної ситуації включає збір та обробку даних щодо метеорологічних умов в зоні аварії, характеру пошкодження технологічного обладнання, виду та кількості небезпечної хімічної речовини, наявних у розпорядження сил та засобів всіх служб цивільного захисту. Блок прогнозування включає введення отриманих вхідних параметрів та розрахунок розмірів зони хімічного ураження в

залежності від кількості та послідовності етапів розповсюдження та осадження небезпечної речовини. Блок прийняття управлінського рішення включає визначення критерію безпеки, географічного розташування границь зони ураження та визначення заходів щодо ліквідації аварії та евакуації населення.

Таким чином, розроблено керуючий алгоритм методики прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів, який базується на послідовності трьох блоків – моніторингу зони надзвичайної ситуації, прогнозування наслідків надзвичайної ситуації та прийняття управлінського рішення. Моніторинг зони надзвичайної ситуації включає збір та обробку даних щодо метеорологічних умов в зоні аварії, характеру пошкодження технологічного обладнання, виду та кількості небезпечної хімічної речовини, наявних у розпорядження сил та засобів всіх служб цивільного захисту. Блок прогнозування включає введення отриманих вхідних параметрів та розрахунок розмірів зони хімічного ураження в залежності від кількості та послідовності етапів розповсюдження та осадження небезпечної речовини. Блок прийняття управлінського рішення включає визначення критерію безпеки, географічного розташування границь зони ураження та визначення заходів щодо ліквідації аварії та евакуації населення.

2.3. Розробка програмної реалізації методики прогнозування хімічної обстановки при аваріях з викидом небезпечних газів

З метою забезпечення практичного користування розробленою моделлю прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів на основі керуючого алгоритму розроблено методику прогнозування хімічної обстановки при аваріях з викидом небезпечних газів. Методика реалізована у вигляді програмного продукту «Прогноз НХР» (рис. 2.8).

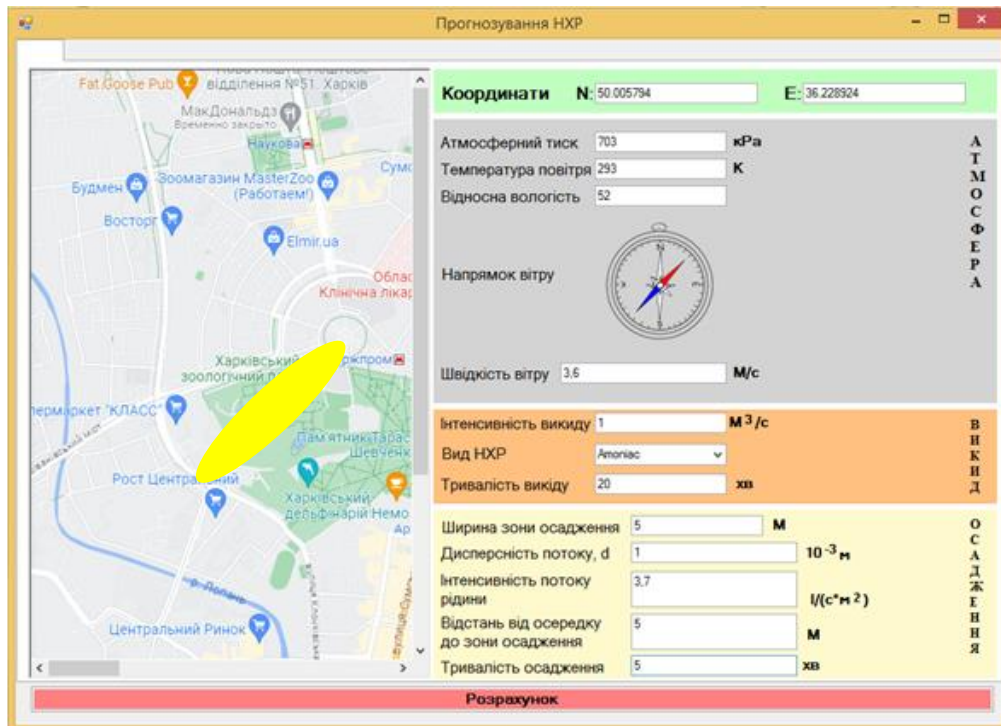


Рис. 2.8. Інтерфейс програмного комплексу «Прогноз НХР»

Інтерфейс програмної реалізації розробленої методики прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій з викидом 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 або навпаки за відомими координатами відображати епіцентр на карті. Координати епіцентру викиду заносяться в окрему область у правій верхній частині інтерфейсу.

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

В окремий блок виведені параметри викиду. З бібліотеки найбільш розповсюджених небезпечних газів оператор може обрати необхідний та занести величину інтенсивності викиду цього газу із технологічного апарату.

Останній блок інтерфейсу призначений для введення параметрів осадження хмари небезпечного газу, а саме ширину зони осадження, інтенсивність та дисперсність водяного потоку, відстань від осередку викиду до початку зони осадження.

Методика працює наступним чином:

1. По прибуттю до місця аварії керівник ліквідації надзвичайної ситуації визначає місце викиду та встановлює його у програмному комплексі «Прогноз НХР» за допомогою інтерактивної карти або координат;
2. Керівник ліквідації надзвичайної ситуації під час проведення розвідки місця аварії за допомогою представника підприємства або спеціального маркування та візуального контролю визначає вид небезпечного газу та оцінює інтенсивність його викиду. Ці данні заносяться до програмного комплексу «Прогноз НХР»;
3. Співробітники штабу за допомогою портативної метеостанції, яка є штатним обладнанням на автомобілях радіаційного та хімічного захисту визначають основні метеорологічні параметри та вносять їх до блоку «Атмосфера» запропонованого програмного комплексу. У випадку відсутності портативної метеостанції, співробітники штабу зв'язуються із оперативним черговим регіонального відділу Державної Гідрометеослужби та дізнаються від нього необхідні данні. В цьому випадку отриманні данні будуть менш точними, так як вони виміряні на найближчому пункті спостереження, а не безпосередньо в зоні аварії;
4. Керівник ліквідації аварії проводить оцінку доступних сил та засобів для проведення осадження небезпечної хмари та при наявності відповідних ресурсів розставляє рятувальників із розпилюючими ми стволами для осадження хмари.
5. Виходячи із кількості розпилюючих стволів та їх тактико-технічних характеристик керівник ліквідації надзвичайної ситуації або

відповідальна особа із його штабу визначає параметри осадження та заносить у відповідний блок інтерфейсу програмного комплексу;

6. Після натискання на кнопку «Розрахунок» програмний комплекс автоматично проводить прогнозування та наносить результати на карту;
7. Керівник ліквідації надзвичайної ситуації проводить оцінку результатів прогнозування та приймає управлінське рішення щодо зміни позиції рятувальників, збільшення або зменшення кількості стволів, що подано на осадження та про необхідність проведення евакуації із прилеглих територій.

Таким чином, розроблено програмна реалізація та запропоновано алгоритм роботи з нею, що дозволить використовувати розроблену методику прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій із викидом небезпечних газів практичним працівникам оперативно-рятувальних підрозділів без окремих навичок програмування. Програма «Прогноз НХР» містить блоки «Атмосфера», «Викид», «Осадження» для введення вхідних параметрів та інтерактивну карту місцевості для виведення результатів прогнозування на неї.

Висновки по розділу 2

1. Розроблена математична модель розповсюдження небезпечного газу в атмосфері при його активному осадженні водними аерозолями дозволяє підвищити точність розрахунків розподілу концентрації газу в атмосфері при роботі стаціонарних та пересувних систем аерозольного осадження. Розроблена математична модель є системою із трьох рівнянь. Перше рівняння описує процес вільного розповсюдження газу після викиду із технологічного обладнання. Друге рівняння описує процес осадження газу із атмосфері дрібнодисперсним рідинним потоком з різною інтенсивністю. Третє рівняння описує процес вільного розсіювання газу в атмосфері після

осадження. За допомогою комп'ютерного моделювання перевірена працездатність розробленою математичної моделі. Використання при моделюванні методу скінчених різниць дозволяє отримувати числові рішення просторового розподілу концентрації газу при його осадженні струменем довільної інтенсивності та форми. Запропонований метод математичного опису процесу сорбції небезпечних газів дозволяє обирати довільну кількість та просторове розміщення вузлових точок, які задовольняють умові Куранта-Фрідрікса-Леві.

2. Розроблено керуючий алгоритм методики прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів, який базується на послідовності трьох блоків – моніторингу зони надзвичайної ситуації, прогнозування наслідків надзвичайної ситуації та прийняття управлінського рішення. Моніторинг зони надзвичайної ситуації включає збір та обробку даних щодо метеорологічних умов в зоні аварії, характеру пошкодження технологічного обладнання, виду та кількості небезпечної хімічної речовини, наявних у розпорядження сил та засобів всіх служб цивільного захисту. Блок прогнозування включає введення отриманих вхідних параметрів та розрахунок розмірів зони хімічного ураження в залежності від кількості та послідовності етапів розповсюдження та осадження небезпечної речовини. Блок прийняття управлінського рішення включає визначення критерію безпеки, географічного розташування границь зони ураження та визначення заходів щодо ліквідації аварії та евакуації населення.

3. Розроблено програмна реалізація та запропоновано алгоритм роботи з нею, що дозволить використовувати розроблену методику прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій із викидом небезпечних газів практичним працівникам оперативно-рятувальних підрозділів без окремих навичок програмування. Програма «Прогноз НХР» містить блоки «Атмосфера», «Викид», «Осадження» для введення вхідних параметрів та інтерактивну карту місцевості для виведення результатів прогнозування на неї.

РОЗДІЛ 3.

ПЕРЕВІРКА ДОСТОВІРНІСТЬ МЕТОДИКИ ПРОГНОЗУВАННЯ ХІМІЧНОЇ ОБСТАНОВКИ ПРИ АВАРІЯХ З ВИКИДОМ НЕБЕЗПЕЧНИХ ГАЗІВ

Розроблено нову експериментальну лабораторну установку, яка дозволяє проводити дослідження динаміки розповсюдження небезпечних газів під впливом дисперсних потоків та імітації повітря та методику проведення таких досліджень.

Проведено експериментальні дослідження швидкості поглинання небезпечних газів дисперсними потоками та динаміки розповсюдження небезпечних газів під впливом дисперсних потоків, які підтвердили достовірність розроблених вище математичних моделей.

На прикладі однієї з надзвичайних ситуацій на хімічно небезпечному об'єкті проведено перевірку розробленої методики прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів.

Основні результати розділу викладені в публікаціях [19, 20, 23, 26, 30, 31].

3.1. Розробка лабораторної установки та методики проведення досліджень динаміки осадження небезпечних газів дисперсними потоками

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

Відома зустрічнопоточна масо- та теплообмінна колона, яка представляє собою циліндричний корпус для взаємодії зустрічних потоків диспергованої рідини та газу, має штуцери підводу та відводу потоків, в корпусі розміщено розпилювач рідини [112]. Суттєвим недоліком цих абсорберів є зустрічно-поточна схема руху газу та рідини в середині корпусу апарату, що приводить до виносу рідинного аерозолу потоком газу, порушення рівномірності розподілу рідини по об'єму камери; також існують обмеження по дисперсності рідинного аерозолу.

Недолік виносу крапель рідини газовим потоком вирішено за рахунок використання прямопоточного абсорбера, який складається з корпусу, штуцера входу та виходу газу та штуцера входу та виходу рідини (абсорбенту), розподілювача потоку рідини, масообмінної секції, каплевідбійника [113].

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

Найбільш близьким до зазначених вище вимог є камера для дослідження процесів масообміну, яка складається з вертикального герметичного корпусу, вентилятору, запірної арматури, форсунок для подачі води, газоаналізаторів та відсіку для горіння [114].

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

В основу розробленої експериментальної установки покладене завдання створення камери для дослідження процесів сорбції газів, яка дозволить моделювати умови контакту рідинних аерозолів та газів (парів)

при різних фізико-хімічних умовах процесу, яка не матиме вищенаведених недоліків, тобто забезпечуватиме горизонтальне розповсюдження газів при різній швидкості повітряного потоку, забезпечить подачу рідинного аерозолу в довільному місці на шляху розповсюдження газу та надасть змогу виміру просторового розповсюдження газу за трьома координатами (рис. 3.1).

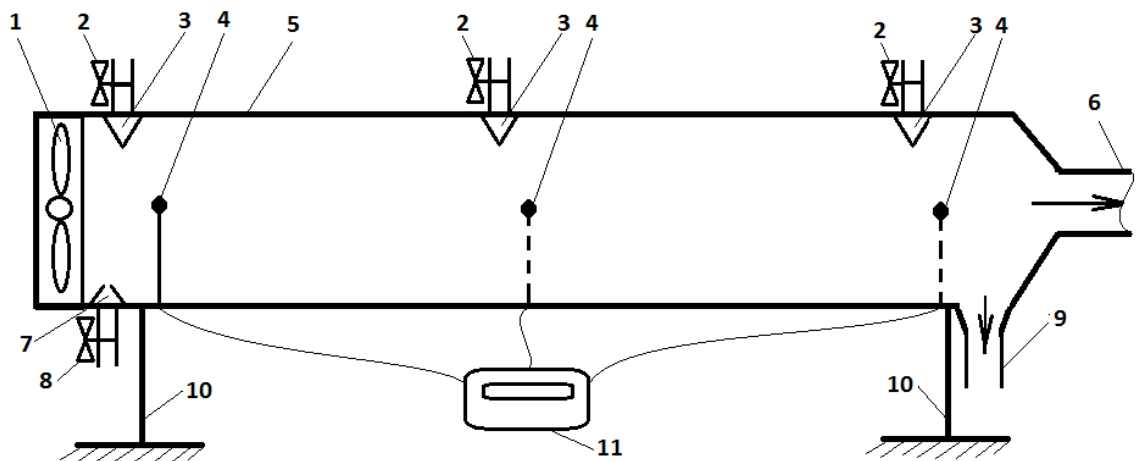


Рис. 3.1. Схема камери для дослідження процесів сорбції газів: 1 – вентилятор; 2 – рідинні запірні крани; 3 – рідинні форсунки; 4 – газоаналізатори; 5 – корпус; 6 – відвідний газовий патрубок; 7 – газова форсунка; 8 – газовий запірний кран; 9 – відвідний рідинний патрубок; 10 – кріплення; 11 – блок індикації газоаналізаторів.

Поставлене завдання вирішується за рахунок того, що камера для дослідження процесів сорбції газів, яка має циліндричну форму та виконана в герметичному виконанні, розміщена у вигляді горизонтальної труби. В якості розпилювачів використовуються з’ємні цільнофакельні форсунки з регулюванням інтенсивності та дисперсності потоку. З одного боку камера додатково обладнується вентилятором для руху газового середовища, з протилежного боку камера обладнана патрубком для виводу газового середовища у безпечне місце та зливним патрубком для відведення рідини [23].

Для візуального контролю процесу абсорбції камера (рис. 3.1) герметичного циліндричного корпусу 5 виконана з прозорою стінкою. Корпус камери 5 розміщено на кріпленнях 10. В верхній частині камери розміщені з'ємні цільнофакельні рідинні форсунки 3 з можливістю регулювання інтенсивності та дисперсності потоку. З'ємне виконання рідинних форсунок дозволяє змінювати місце розташування та їх кількість, що дає змогу досліджувати процеси сорбції газів рідинними аерозолями різної інтенсивності на різних етапах розповсюдження газової хмари. Рідинні форсунки 3 обладнанні рідинними запірними кранами 2 для регулювання потоку рідини. Для моделювання газового потоку по об'єму камери з одного боку корпусу 5 встановлено повітряний вентилятор 1 зі змінною інтенсивністю обертання. Протилежний бік корпусу 5 обладнано патрубком 6 для відведення газового середовища із камери до небезпечного місця. Встановлені в довільному місці корпусу 5 газоаналізатори 4 дозволяють контролювати концентрацію газу в об'ємі камери. Кількість та місце розміщення газоаналізатору може змінюватись [19]. Дані від мережі газоаналізаторів поступають до блоку індикації 11, де вони обробляються та візуалізуються. З одного боку корпусу 5 розміщено газову форсунку 7 для подачі газу в об'єм камери. Для регулювання інтенсивності подачі газу крізь форсунку 7 на її вході розміщено газовий запірний кран 8. Відпрацювана рідина зливається з камери крізь відповідний рідинний патрубок 9.

Методика проведення експериментальних досліджень на установці (рис. 3.1) полягає у наступному. Крізь форсунку 7 в камеру 5 подається газ, що досліджується. Інтенсивність подачі газу регулюється газовим запірним краном 8. Швидкість руху газу вздовж камери 5 регулюється обертами вентилятора 1, який ініціює рух газу від форсунки 7 до патрубку 6 для відведення газового середовища із камери в небезпечне місце, наприклад під витяжну шафу. Горизонтальний розподіл концентрації газу вимірюється газоаналізаторами 4, розміщеними уздовж камери 5. Дані вимірів газоаналізаторів 4 виводяться до блоку індикації 11. Вздовж корпусу

5 встановлені рідинні форсунки 3, крізь які подається рідинний потік в об'єм камери. За допомогою форсунок 3 змінюється дисперсність потоку, а інтенсивність рідинного потоку регулюється запірними кранами 2. Відпрацьована рідина стікає по нижній частині камери до відповідного рідинного патрубку 9. При проході газової хмари крізь рідинний аерозольний потік відбувається сорбція газу, інтенсивність процесу сорбція визначається порівнянням розподілу концентрація газової хмари при всіх рівних умовах окрім відсутності та наявності рідинного потоку [30].

Як видно з рис. 3.1 вздовж розробленої камери розміщено три блоки форсунок та газоаналізаторів. Особливістю розробленої експериментальної установки є можливість збільшення таких блоків, якщо це дозволяють габарити експериментальної установки.

В якості перспективи доцільно зробити мережу газоаналізаторів, як по довжині камери, так і по висоті. У реалізованій авторами дослідній установці це недоцільно, так як габаритні розміри внутрішнього об'єму камери незначні. Це призводить того, що розподіл концентрації газу по висоті камери несуттєвий і вимір об'ємного розподілу не дасть адекватних результатів. При створенні лабораторної установки з діаметром газової камери $> 0,3$ м облаштування мережі газоаналізаторів дозволить досліджувати динаміку розподілу газу по всім трьом координатам, що суттєво розширить можливості розробленої установки [31].

Для розширення можливостей розробленої експериментальної камери (рис. 3.1) доцільно зробити опори 10 у телескопічному вигляді. Такі гази, як Cl_2 та більшість бойових отруйних газів мають густину > 29 кг/м^3 , що призводить до прояву деяких рідинних властивостей в повітрі. Для таких газів кут нахилу по шляху розповсюдження має суттєве значення. Дослідження цих ефектів для «важких» газів можливе при зміні кута нахилу розробленої камери [19].

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

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

Запропонована методика представляє собою послідовність дій дослідника для якісного виміру просторового розподілу концентрації газів із врахуванням особливостей камери. При проведенні досліджень з небезпечними газами відбувається виведення газів із зони роботи дослідника та відведення забрудненої рідини для окремої утилізації чи дегазації.

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

3.2. Експериментальна перевірка достовірності отриманих математичних моделей

3.2.1. Експериментальна перевірка достовірності математичних моделей сорбції небезпечних газів дисперсними рідинними потоками

Для перевірки моделі сорбції небезпечних газів дисперсними рідинними системами було проведено розрахунково-експериментальний порівняльний аналіз впливу інтенсивності потоку аерозолу на швидкість вимивання хлору водним аерозолем (Рис. 3.2). Хлор був обраний як приклад, оскільки моделі для цього газу були повністю розглянуті та неодноразово перевірені з використанням критеріальних рівнянь і математичних імітаційних моделей [80, 81].

Для дослідження процесів осадження газоподібних, рідких і твердих дисперсних речовин (у тому числі диму) водними аерозолями різної інтенсивності та дисперсності розроблено та створено лабораторну експериментальну установку, план якої наведено на рисунку. 3.2.

Для вивчення процесу абсорбції в різних фізико-хімічних умовах корпус камери виконано в герметичному виконанні.

Для візуального контролю процесу абсорбції герметична циліндрична корпусна камера виконана з прозорою стінкою. У верхній частині камери розташовані одиночні знімні форсунки, розташовані згідно з планом рис. 3.2. Рідина до плодів подається через штуцери із запірною арматурою і витратоміром рідини. Замінюючи форсунки з різними геометричними параметрами, замінюючи певні форсунки в ковпачку і змінюючи витрату рідини, можна регулювати інтенсивність і розподіл потоку рідкого аерозолу. У верхній частині камери встановлена форсунка із запірною арматурою та ультразвуковий дифузор для введення в об'єм камери дрібнодисперсного рідкого аерозолу з розсіпом 0,01-0,5 мм. від залишкових газів і аерозолів у верхній частині камери встановлена форсунка із запірною арматурою і витяжним вентилятором, у верхній і нижній частинах камери

встановлені всмоктувальні патрубки газоаналізаторів, які дозволяють визначення середньої об'ємної концентрації поглиненого газу. Для контролю інтенсивності масообміну та відбору поглинаючих проб у нижній частині камери встановлюють трубку із запірною арматурою. В газ (пар) вводять об'єму камери через форсунку з клапаном Запірна і витратомір Дослідження проводяться як після встановлення стабільної концентрації в об'ємі камери, так і в нестационарному стані.

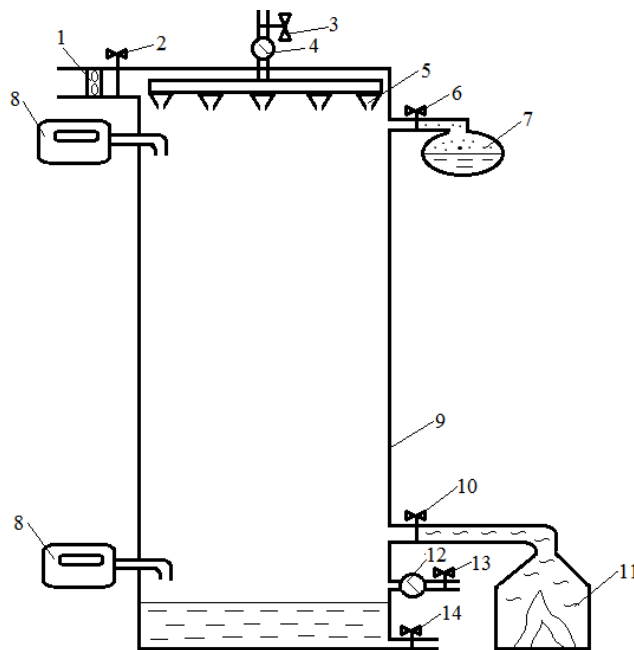


Рис. 3.2. Схема лабораторної установки для дослідження процесів сорбції газів: 1 – вентилятор; 2, 6, 10, 13 – газові крани; 3, 14 – рідинні крани; 4 – рідинний витратомір; 5 – форсунки; 7 – ультразвуковий диспергатор; 8 – газоаналізатори; 9 – корпус; 11 – відсік для горіння; 12 – газовий витратомір

У камері є газоаналізатор для визначення вмісту газу та постійного моніторингу зміни його концентрації. Оскільки гази можуть розподілятися по об'єму камери нерівномірно, для визначення середньооб'ємної концентрації у верхній і нижній частинах камери розташовані газоаналізатори.

Компактна конструкція корпусу камери дозволяє проводити експерименти з постійною концентрацією газу і в нефіксованому положенні.

Під час експерименту можна взяти пробу сорбенту для контролю її насичення сорбентом.

Масу крапель визначали з розрахунку розсіювання $r \approx 0,8$ мм, а швидкість краплі вибирали як середній розмір з розрахунку висоти камери $H = 2$ м. Вимірювання проводили в серії з трьох експериментів, в яких визначали середнє значення виміряних даних. Також слід зазначити, що оскільки швидкість поглинання має однакову ступінь залежності від концентрації та розміру крапель, а інтенсивність потоку ($J \sim C_{\text{drop}}$, $J \sim R^3$) різна, то при однаковій інтенсивності потоку кращим є тонкий потік із великою концентрацією крапель і поверхнею поглинання.

Результати досліджень осадження небезпечної газоподібної речовини представлені на рис. 3.3 [23].

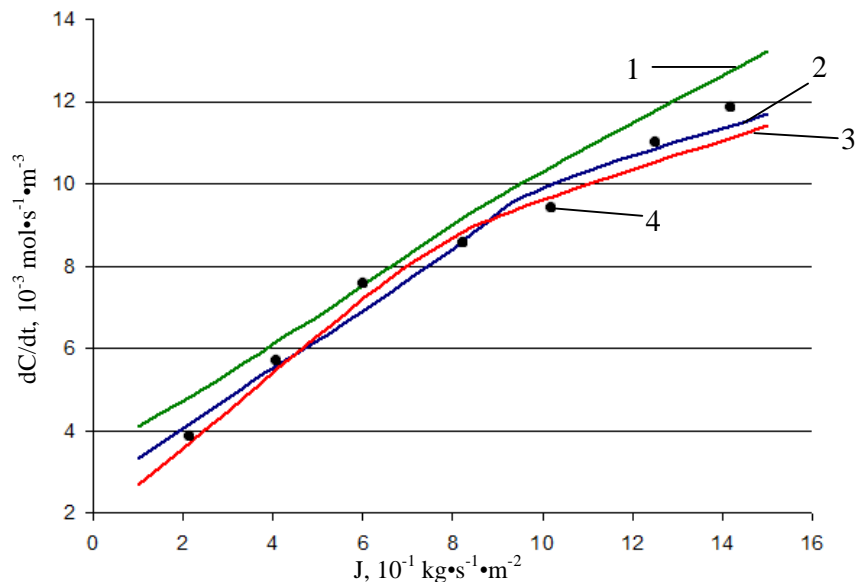


Рис. 3.3. Швидкість поглинання хлору водним аерозолем при різних інтенсивності потоку: 1 – розрахунок по критеріальному рівнянню; 2 – розрахунок за допомогою доповненої поетапної моделі; 3 – розрахунок за допомогою симуляційної математичної моделі MD; 4 – експериментальні дані

З аналізу теоретичних та експериментальних результатів можна зробити висновок, що найбільшу адекватність опису експериментальних даних має імітаційна модель MD. Діапазон похибок розрахунків відносно кривої 3 становить 4–14 % для кривої 1 та 0–6 % для кривої 2. Між кривими 2 та 3 є точки перетину, що свідчить про адекватність їх у зонах $J = 4,2 \cdot 10^{-1}$ та $8,7 \cdot 10^{-1} \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$. Іншим важливим моментом поетапної моделі сорбції є те, що вона дозволяє врахувати більшість основних фізико-хімічних закономірностей сорбції. У той же час, комплементарна ступінчаста модель від нас (кр. 2) також має високий ступінь точності. Незважаючи на те, що представлена експериментальна методика має певну невідповідність фізичних властивостей модельної системи (дисперсія швидкості падіння висоти, розподіл крапель за розміром), отримані результати задовільно узгоджуються з розрахунковими даними (рис. 3.3) і експериментальні дані інших дослідників [13, 15]. Водночас представлені в роботі можливості експериментальної установки дозволяють моделювати більшість фізико-хімічних властивостей як системи, так і задіяних у ній матеріалів.

Перевірка адекватності моделі проводилась за критерієм Фішера:

$$F = \frac{s_{\text{ад}}^2}{s_0^2} \leq F_{(0.05; f_{\text{ад}}; f_y)}, \quad (3.1)$$

де $s_{\text{ад}}^2 = \frac{\sum_{u=1}^m (y_u^- - y_u)^2}{n - k - 1}$; s_0^2 – дисперсія нульової гіпотези; y_u – розрахункове значення відклику в u -му досліді; $F_{(0.05; f_{\text{ад}}; f_y)}$ – критерій Фішера за 5% – го рівня значущості; $f_{\text{ад}}$ – число ступенів свободи дисперсії адекватності; f_y – число ступенів свободи дисперсії відтворення.

$$F = 2,7862 < F_{(0.05; f_{\text{ад}}; f_y)} = 3,9381. \quad (3.2)$$

Тому тест на адекватність модифікованої моделі дав позитивний результат.

Оскільки швидкість вимивання залежить від часу, бажано розглядати не миттєву швидкість вимивання, а час вимивання речовини з певною початковою концентрацією (рис. 3.4). При цьому передбачається, що весь газ рівномірно розподілений у поверхневому шарі висотою 5 м.

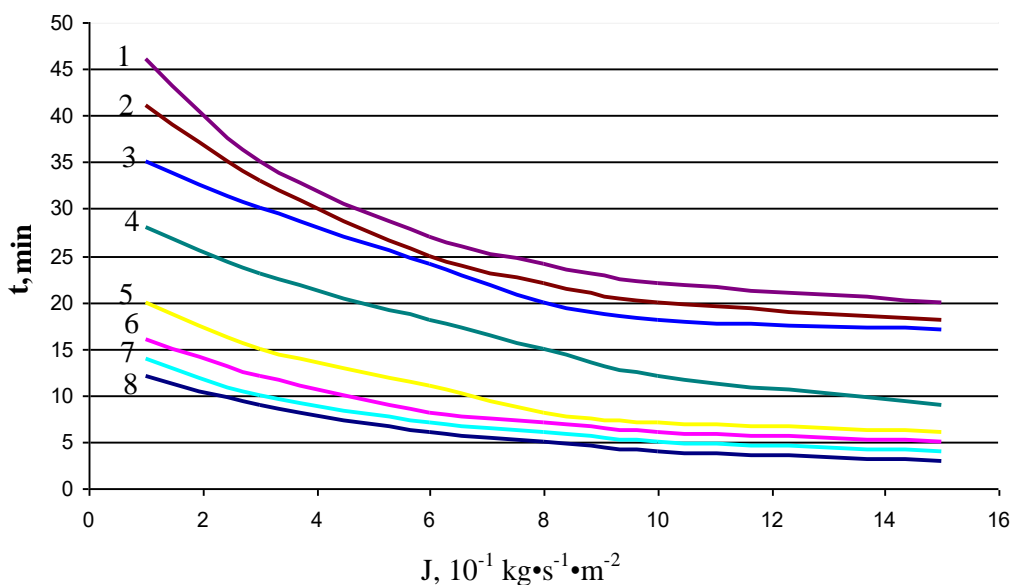


Рис. 3.4. Залежність часу осадження небезпечних газів з атмосфери від інтенсивності дисперсного потоку: 1 – NO_2 ; 2 – Cl_2 ; 3 – H_2S ; 4 – SO_2 ; 5 – HCN ; 6 – COCl_2 ; 7 – HCl ; 8 – NH_3

З рис. 3.4 видно, що час вимивання газів з атмосфери чітко залежить від їх розчинності (див. табл. 2.1), тобто чим вища розчинність газу, тим менший час вимивання. Найбільша ефективність седиментації спостерігається при забрудненні атмосфери аміаком, що пояснюється найвищою розчинністю аміаку серед досліджуваних газів. Слід зазначити низьку інтенсивність змивання хлору та сірководню, які відносяться до II класу шкідливості.

У роботі модифіковано покрокову модель процесу адсорбції газоподібних шкідливих речовин дрібнодисперсним водяним туманом, яка

включає опис дифузії шкідливих газів в атмосфері, їх перебування на поверхні краплі, дифузія в розмірі крапель і можливість хімічного рівняння зі спеціальними добавками.

Найбільш доцільним є використання модифікованої моделі фазового поглинання для прогнозування хімічно небезпечних процесів промивання газу водяним туманом. Оскільки швидкість поглинання залежить від концентрації та розміру крапель, але інтенсивності потоку різні ($J \sim C_{\text{drop}}$, $J \sim R^3$), то при однаковій інтенсивності потоку дрібнодисперсний потік з великою концентрацією крапель і специфічною поверхнею розділу засвоюється ефективніше.

Лабораторна установка, розроблена для дослідження процесів осадження газоподібних і дисперсних речовин, є кімнатою для дослідження процесів масообміну та експериментальним методом, що дозволяє перевірити достовірність розроблених моделей осадження шкідливих речовин за допомогою аерозолів в ліквідація наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру шляхом викидів шкідливих речовин газів з атмосфери.

Експериментально підтверджено адекватність модифікованої моделі для адсорбції газу дисперсним аерозолем з адекватністю 5% за критерієм Фішера. Модифікована модель потребує менше вхідних параметрів і за рахунок спрощення підвищує ефективність прогнозування.

3.2.2. Експериментальна перевірка достовірності математичної моделі прогнозування хімічної обстановки при аваріях з викидом небезпечних газів

Відповідно до методики планування та проведення експериментів [20], дослідження по встановленню впливу осадження газу на динаміку його просторового розповсюдження проводились по три виміри при всіх однакових умовах. Якщо не спостерігалось у трьох вимірах суттєвих

викидів, то для подальшого аналізу обиралися середні значення. При виявленні викидів значень більше 25%, це значення не враховувалося та проводився додатковий вимір. Дисперсність водяного потоку складала 1 мм. При дослідженні варіювались два параметри – швидкість потоку повітря та інтенсивність подачі дисперсного потоку. З метою забезпечення безпеки роботи із небезпечними отруйними речовинами експериментальні дослідження проводилися у засобах індивідуального захисту та у лабораторних умовах із постійним відводом забрудненого повітря (рис. 3.5).



Рис. 3.5. Заходи безпеки при проведенні експериментальних досліджень

З метою вирішення цієї задачі проведено експеримент типу 2^2 . Для побудови полінома другого порядку користувалися методом Бокса-Вільсона [115], відповідно до якого використали ортогональні плани першого порядку як ядро, на якому потім добудовували конструкцію плану другого порядку. Переведення натуральних змінних у кодовані представлено у табл. 3.1 [19].

Таблиця 3.1. - Кодування даних

Рівень та інтервал зміни факторів	Швидкість повітряного потоку, м/с	Інтенсивність дисперсного потоку, л/с
Нульовий рівень, $x_i=0$	3	1,2
Інтервал зміни, δ_i	2,5	1
Верхній рівень, $x_i=1$	5,5	2,2
Нижній рівень, $x_i=-1$	0,5	0,2
Кодове позначення	X_1	X_2

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

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

Матриця двофакторного експерименту по визначенню впливу осадження газу на динаміку його просторового розповсюдження наведена в таблиці 3.2. Для порівняння результатів експериментів в табл. 3.2 також наведені результати чисельних розрахунків за тими ж параметрами.

Графічна інтерпретація отриманих експериментальних даних із співставленням з результатами розрахунків за моделлю [17] представлено на рис. 3.5.

Таблиця 3.2. - Результати досліджень по осадженню аміаку

Експеримент	$X_1(v)$	$X_2(I)$	Концентрація газу (експеримент) q_e , г/м ³	Концентрація газу (розрахунок) q_m , г/м ³
Планування типу 2^2	-1	-1	0,71	0,68
	+1	-1	0,65	0,67
	-1	+1	0,04	0,05
	+1	+1	0,11	0,09
Нульова точка	0	0	0,27	0,32

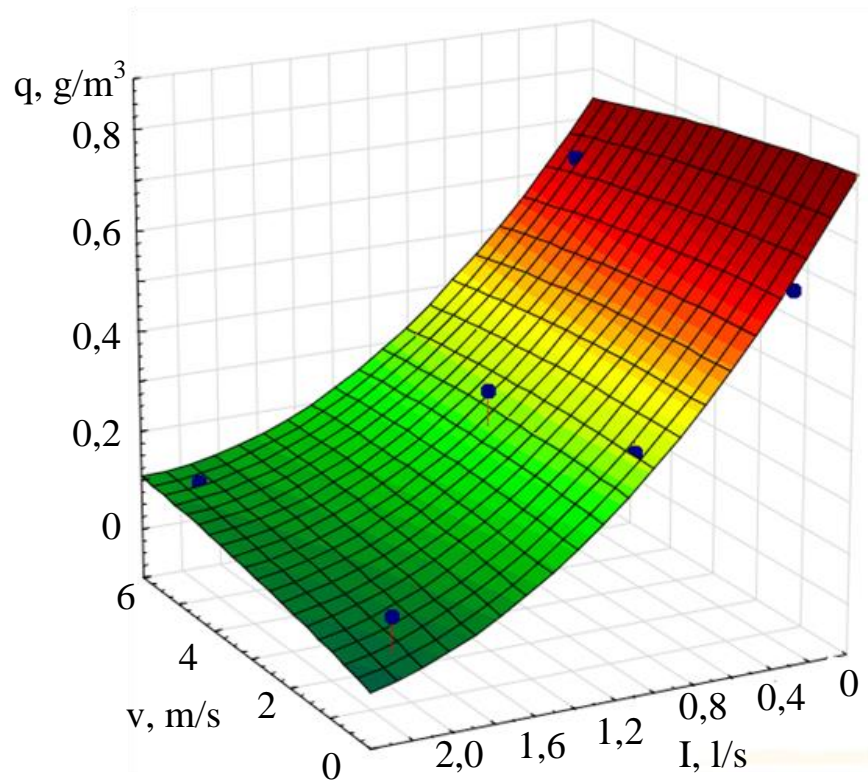


Рис. 3.5. Розподіл концентрації аміаку при різній швидкості повітряного потоку (v) та інтенсивності дисперсного потоку рідини (I): поверхня – розрахункові данні за моделлю [16]; крапки – експериментальні данні

$$q = 0,106 \cdot I^2 - 0,001 \cdot v^2 - 0,6 \cdot I - 0,006 \cdot v + 0,013 \cdot I \cdot v + 0,827, \quad (3.3)$$

Перевірка адекватності моделі проводилась за критерієм Фішера:

$$F = \frac{s_{ад}^2}{s_0^2} \leq F_{(0.05; f_{ад}; f_y)}, \quad (3.4)$$

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

розрахункове значення відклику в u -му досліді; $F_{(0.05; f_{ад}; f_y)}$ – критерій Фішера за 5% – го рівня значущості; $f_{ад}$ – число ступенів свободи дисперсії адекватності; f_y – число ступенів свободи дисперсії відтворення.

$$F = 1,976 < F_{(0.05; f_{ад}; f_y)} = 2,164. \quad (3.5)$$

Відповідно перевірка адекватності моделі прогнозування масштабів хімічного ураження за умов осадження небезпечної хмари [17] дала позитивний результат.

Результати експериментальних досліджень з аміаком (рис. 3) показали суттєвий вплив наявності дисперсного осадження газу водою, що дозволяє знизити концентрацію газу у 15–17 разів. Така висока інтенсивність осадження пояснюється високим значенням коефіцієнту Генрі для аміаку, який становить $H=0,27$ моль·м⁻³·Па⁻¹. Слід зауважити, що коефіцієнт Генрі суттєво залежить, як від температури так і від тиску, тому ці параметри необхідно фіксувати при проведенні експериментальних досліджень та враховувати при інтерпретації отриманих результатів.

Незважаючи на те, що перевірка адекватності теоретичних розрахунків та експериментальних досліджень дала позитивний результат, з табл. 3.2 видно, що існує деяка похибка вимірювань. Для запропонованої компоновки експериментальної установки основний внесок у виникнення похибок вимірювань чинить інерційність роботи газоаналізаторів. Усунути цей недолік можливо за рахунок використання менш енергійних та більш точних газових датчиків та апаратури обробки сигналу. Також підвищити

точність вимірювань дозволить збільшення габаритних розмірів експериментальної камери.

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

3.3. Оцінка ефективності методики прогнозування хімічної обстановки при аваріях з викидом небезпечних газів

Методики прогнозування ефективності ліквідації аварій з викидом небезпечних газів на основі запропонованої в роботах [16-20] та експериментально перевіреної вище моделі прогнозування масштабів хімічного ураження за умов осадження небезпечної хмари передбачає виконання трьох процедур. Перша процедура передбачає проведення моніторингу епіцентру викиду небезпечної хімічної речовини та зони розповсюдження хмари за допомогою стаціонарних систем моніторингу стану атмосферного повітря, проведення хімічної розвідки на місці аварії та використання лідарів на безпілотних літальних носіях. Другий етап методики передбачає прогнозування інтенсивності осадження небезпечного газу дисперсними потоками з урахуванням наявних ресурсів. Для цього керівником ліквідації аварії проводиться оцінка наявних сил та засобів та проводиться розрахунок розмірів зони хімічного ураження з використанням моделі [16]. На третьому етапі керівник приймає управлінське рішення щодо

безпечного розташування сил та засобів та проведення евакуації населення із зони ураження.

З метою перевірки ефективності практичного використання запропонованої методики проведено порівняльний аналіз основних параметрів аварії з викидом аміаку (табл. 3.3). В якості основи обрано опис ліквідації реальної хімічної аварії, що сталась на підприємстві «Стирол» у м. Горлівка у 2013 році. Для порівняння основні параметри аварії розраховані за допомогою діючої Методики прогнозування наслідків викидів (виливів) небезпечних хімічних речовин, яка затверджена наказом МВС України № 1000 від 29.11.2019 та з результатами прогнозування за запропонованою в роботі методикою [29].

Таблиця 3.3. - Порівняльні данні параметрів аварії з викидом аміаку

Параметри аварії з викидом аміаку	За описом аварії на заводі «Стирол» (2013 рік)	Розрахунок параметрів аварії за наказом МВС України № 1000 від 29.11.2019 року	Розрахунок параметрів аварії за розробленою методикою
Розміри зони хімічного ураження до початку локалізації	3,4 км ²	4,5 км ²	3,7 км ²
Розміри зони хімічного ураження через 15 хв після початку локалізації	1,5 км ²	4,5 км ²	1,1 км ²
Подано стволів на осадження	5 («Б»)	7 («Б»)	5 («Б»)

Кількість людей, що потрапило в зону хімічного ураження	127	600	450
Час осадження хмари	40 хв	60-90 хв	33 хв

Порівнюючи перший основний параметр аварії на «Стирол» (табл. 3.3), а саме розміри зони хімічного ураження на момент прибуття першого рятувального підрозділу слід зазначити, що данні в описі аварії на «Стирол» взяті за результатами проведення первинної розвідки. Результати прогнозування розмірів зони хімічного ураження за запропонованою методикою мають розбіжність 8 % та більш наближені до реального стану у порівнянні із затвердженою методикою із розбіжністю 24 %. Це пояснюється тим, що в запропонованій методиці використовується математична модель на основі гаусової моделі дифузії газів, в той час як затверджена методика заснована на табульованих значення розмірів зони із певним кроком. Додатковим фактором є навмисне завищення результатів прогнозування в затвердженій методиці із врахуванням коефіцієнту безпеки.

При порівняння розмірів зони хімічного ураження після початку активного осадження використання даних затвердженої методики є некоректним так, як ця методика не передбачає врахування осадження небезпечних газів дисперсними потоками при розрахунках розмірів хімічного ураження. Затверджена методика передбачає лише рекомендовану кількість стволів для осадження хмари. Враховуючи суттєве завищення розмірів зони ураження затверджена методика відповідно рекомендує надлишкову кількість стволів – 7. При розрахунках за запропонованою методикою прогнозованої зони ураження при використанні 5 стволів «Б» отримали площу на 27% меншу від реальної, що пояснюється оптимізацією розміщення рятувальників по площі ураження та можливістю ближчого розміщення ланок для осадження небезпечної хмари.

Порівняльні данні по кількості постраждалих, що опинились в зоні хімічного ураження, показують розбіжність по запропонованій методиці в 3 разі по затвердженій в 4 рази. Така значна розбіжність пояснюється методикою розрахунку кількості постраждалих, яка враховує густину наявності людей, яка відповідає житловим районам. При цьому переважна територія зони ураження знаходилась на території підприємства, та в зону ураження потрапили лише працівники «Стирол».

Оптимізація за запропонованою методикою процесу локалізації зони ураження також дозволяє зменшити час осадження хмари на 17% від витраченого часу при реальній аварії та на 90–180 % від прогнозованого часу за затвердженою методикою.

Основною перевагою та особливістю запропонованої методики є врахування процесів осадження газової хмари при довільній формі зони осадження. Однак розробленій методиці притаманне таке обмеження, як висота зони осадження. Хоча математична модель здатна працювати при довільній висоті подачі дисперсного струменя, однак сучасні технічні засоби здатні забезпечити максимальну висоту до 50 метрів.

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

Висновки по розділу 3.

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

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

3. Встановлено, що використання запропонованої методики прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів, яка передбачає виконання трьох процедур, а саме: проведення моніторингу епіцентру викиду небезпечної хімічної речовини та зони розповсюдження хмари; прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів з урахуванням наявних ресурсів; прийняття управлінського рішення щодо ліквідації надзвичайної ситуації, дозволяє підвищити точність прогнозування зони хімічного ураження без осадження

на 16% та при активному осадженні у 4 рази. Це дозволяє суттєво підвищити ефективність ліквідації хімічних аварій за рахунок більш інтенсивного осадження при мінімізації безпечної відстані для рятувальників та оптимізації інтенсивності подачі дисперсного потоку.

РОЗДІЛ 4.

ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО ПРАКТИЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ МЕТОДИКИ ПРОГНОЗУВАННЯ ХІМІЧНОЇ ОБСТАНОВКИ ПРИ АВАРІЯХ З ВИКИДОМ НЕБЕЗПЕЧНИХ ГАЗІВ

Запропонована загальна система організації процес ліквідації надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів в атмосферу.

Розроблені практичні рекомендації для використання керівниками ліквідації надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів.

Основні результати розділу викладені в публікаціях [15, 16, 19, 24, 25].

4.1. Розробка системи організації процесу ліквідації надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів

При розробці методики прогнозування рівня хімічного ураження необхідно дотримуватись принципів поетапності дій та міжрівневих прямих та зворотних зв'язків. При цьому за кожний окремий етап можуть відповідати різні служби та виконавці, однак їх взаємодія координується загальним оперативно-рятувальним штабом.

Першим етапом методики є проведення моніторингу зони надзвичайної ситуації. Структура моніторингу надзвичайних ситуацій складається із трьох рівнів [116]. До першого рівня відносяться пристрої реєстрації небезпечних факторів або метеорологічних параметрів (Рис. 4.1).



Рис. 4.1. Стационарний комплекс метеорологічного контролю та контролю хімічного стану повітря

Такі прилади можуть застосовуватись як для реєстрації одного параметра, так і декількох параметрів паралельно. Оскільки контроль параметрів необхідно проводити в різних точках простору, то пристрої контролю можуть бути рознесені по горизонталі (у точках із різними географічними координатами) та по вертикалі (контроль параметрів на різних висотах).

Для отримання більш якісної моніторингової інформації бажано використовувати різноступеневу систему моніторингу з інтеграцією різних приладів контролю. Серед існуючих потужних систем метеорологічного моніторингу слід виділити метеорологічні радіолокаційні станції (МРЛ), що використовуються для обслуговування руху повітряних суден (рис. 4.2).

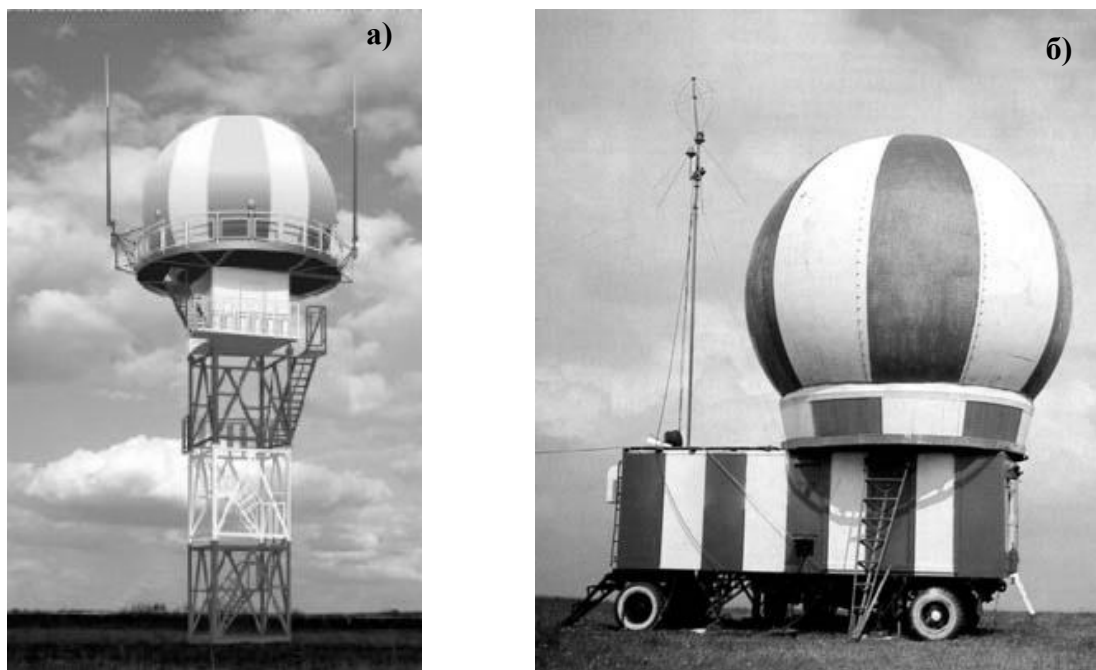


Рис. 4.2. Стационарне (а) та мобільне (б) розміщення МРЛ

Метеорологічні радіолокатори та автоматизовані метеорологічні радіолокаційні комплекси призначені для виявлення місця розташування купчастих, купчасто-дошових та шарувато-дошових хмар та пов'язаних з ними небезпечних для авіації метеорологічних явищ (гроза, дощ, турбулентність, зрушення вітру та ін.), а також для визначення швидкості та напрямку їхнього переміщення з метою забезпечення безпеки польотів [117, 118].

МРЛ – двохвильовий ($\lambda_1 = 3,2$ см; $\lambda_2 = 10$ см) високопотенційний метеорологічний радіолокатор, що випускається в стаціонарному та пересувному варіантах комплектування (на причепі) (рис. 4.2).

Автоматизовані метеорологічні радіолокатори (АМРК) має системи автоматизованої обробки та передачі отриманих від радіолокатора даних (рис. 4.3).

Антенна МРЛ складається з великого та малого параболічних відбивачів та зведеного двохдіапазоного опромінювача. Великий параболічний відбивач являє собою параболоїд обертання із круговим розкритом. Розкрит діаграми спрямованості становить $1,5^\circ$. Сканування по куту місцевості від -1° до 95° .

Імпульсна потужність на виході 250 кВт та 800 кВт. Більш детально технічні дані МРЛ-5 наведені в РД 52.04.320-91 «Посібник з проведення спостережень та використання інформації з неавтоматизованих радіолокаторів МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5»

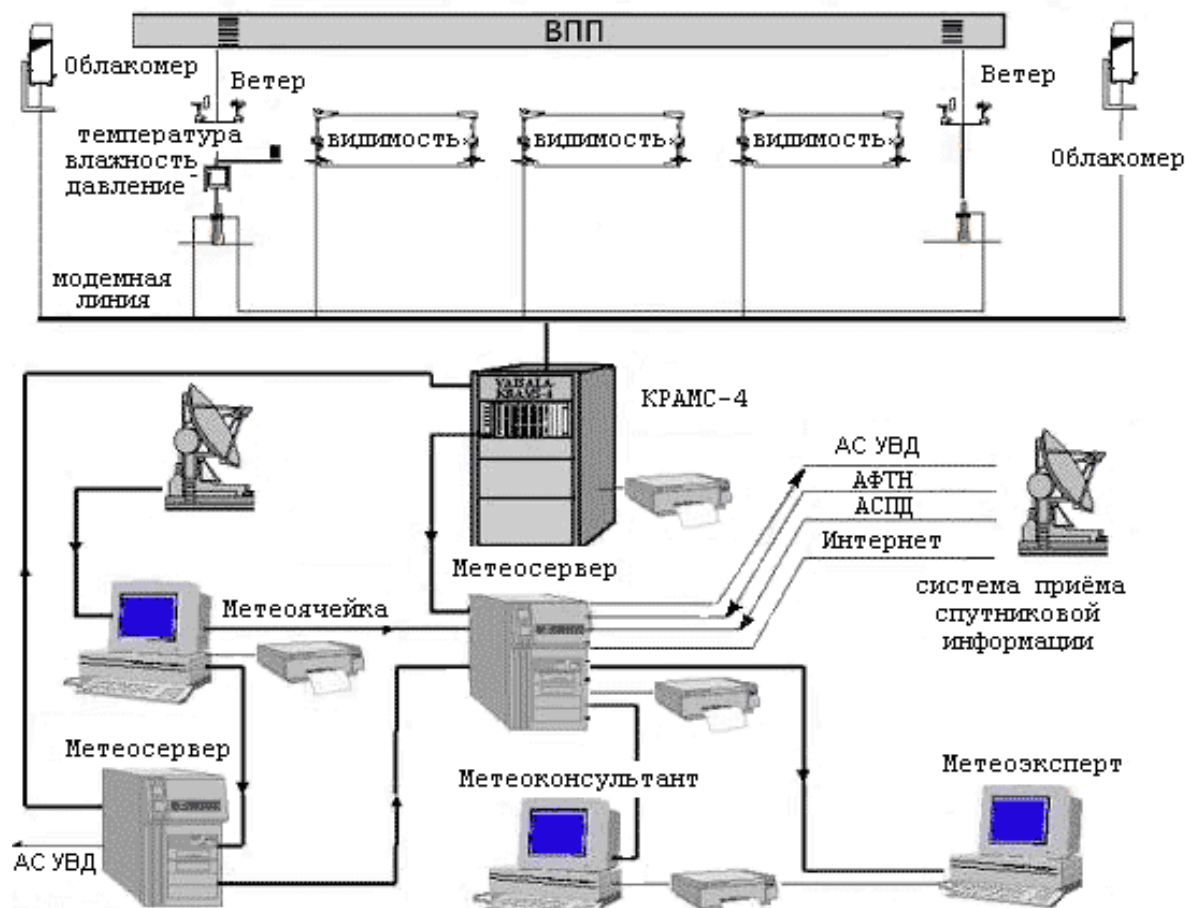


Рис. 4.3. Комплексна схема АМРК

Отримана засобами контролю параметрів первинна інформація за допомогою кабелів або радіоканалів передається до приладів другого рівня, які призначені для обробки отриманої інформації та надання її на третій рівень у зручній формі. На третьому рівні проводиться аналіз отриманої інформації та приймається рішення про подальші дії з ліквідації надзвичайної ситуації.

З розвитком технологій зв'язку та телекомунікацій існує можливість об'єднання систем моніторингу декількох держав, таким чином створюється

глобальна система моніторингу міжнародного рівня [119]. Зі збільшенням рівня системи моніторингу значно ускладнюється структура побудови системи, а саме підсистеми обробки, аналізу та систематизації інформації. Існують два підходи до побудови систем моніторингу регіонального, державного та міжнародного рівнів [120]. До першого відноситься розробка технічної бази, яку відразу орієнтовано на моніторинг зони значних розмірів. До таких систем насамперед відносяться супутникові системи моніторингу. У другому підході реалізується принцип об'єднання та систематизації даних із приладів моніторингу об'єктового рівня. Розгалуженість мережі таких приладів контролю дає змогу побудувати систему моніторингу регіонального та державного рівнів [121].

Крім рівневої градації, системи моніторингу можна розділити по основних принципах збору інформації (рис. 4.4).

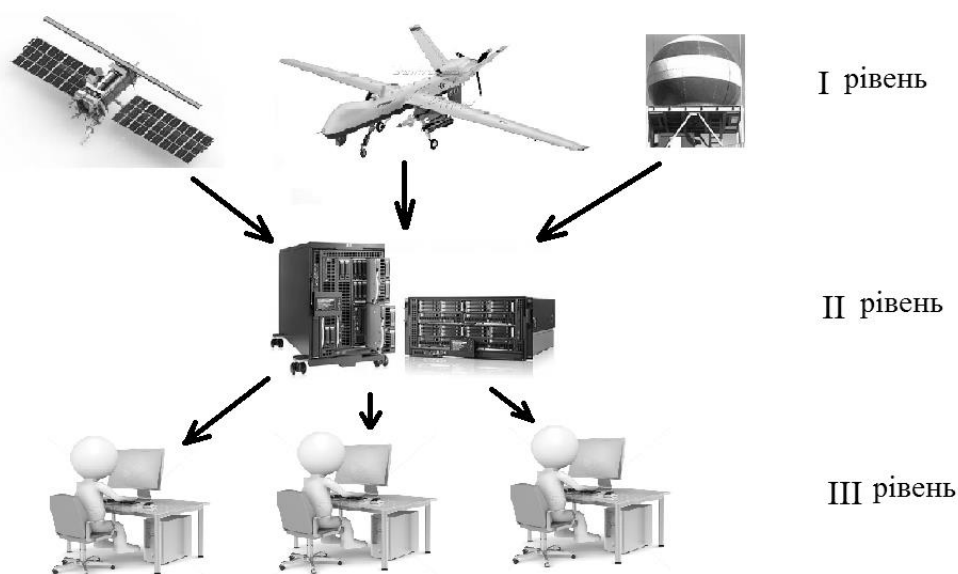


Рис. 4.4. Класифікація систем моніторингу зони НС та метеообстановки

До першого класу систем відносяться космічні апарати дистанційного зондування Землі [122, 123].

Дистанційне зондування Землі з використанням штучних супутників забезпечує можливість одержання інформації про екологічний та

метеорологічний стан зони забруднення та прилеглої території у глобальному масштабі з високим рівнем просторово-тимчасового розпізнавання. При цьому контролюються фізичні, хімічні, біологічні та геометричні параметри зони моніторингу [124, 125].

В Європі розробка супутникових систем моніторингу проводиться у державах Європейського союзу та у Російській Федерації за програмою GMES, що використовує супутники «Envisat» та «Metop». Супутниковий моніторинг метеорологічної обстановки на планеті проводиться з метою виявлення швидкості та напрямку вітру, вологості та температури [126, 127].

В галузі розробки та використання космічних засобів моніторингу атмосфери передову позицію займають Сполучені Штати Америки. У США реалізовано супутникову метеорологічну систему, що перебуває в рамках програми NOAA (National Oceanic Atmospheric Administration) та має на полярних орбітах супутники «NOAA» та геостаціонарні супутники «GEOS». Канадська система моніторингу використовує супутники «Radarsat» [128].

Крім того, міністерством оборони США запущено супутникову метеорологічну систему DMSP (Defense Meteorological Satellite Project). Використання в системі DMSP мікрохвильових радіометрів як всепогодних вимірників параметрів атмосфери дозволяє реалізувати цілодобовий моніторинг гідрометеорологічних явищ країн-членів WMO (Всесвітньої метеорологічної організації) [129].

Також американським урядом ухвалено рішення про створення Національної супутникової системи моніторингу навколишнього середовища з полярної орбіти «NPOESS» (National Polar-Orbiting Operational Environment Satellite System) [130]. Вказана система координує роботу військової (DMSP) та цивільної (NOAA) супутникових систем, а також включає дослідницькі супутники «Wind», «Coriolis», «Terra», «Aqua» (рис. 4.5) [131].

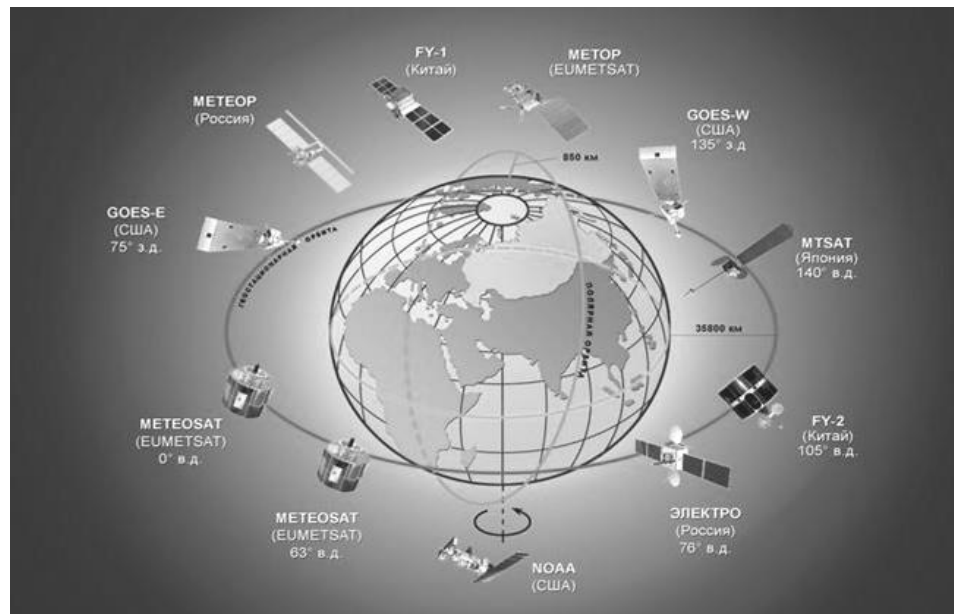


Рис. 4.5. Міжнародне угруповання метеосупутників

Через жорсткі масогабаритні обмеження штучних супутників Землі (ШСЗ) функції аналізу отриманої інформації перекладені на наземний сегмент загальної системи моніторингу.

Необхідно відзначити, що космічні системи моніторингу володіють рядом істотних недоліків стосовно до ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій. Найчастіше це неможливість знаходження супутника безпосередньо над зоною виникнення надзвичайної ситуації в необхідний проміжок часу, істотний вплив хмарності на результати моніторингу, вузький спектр вимірюваних параметрів і низька точність виміру за висотою над рівнем Землі.

Виключити недоліки космічних систем моніторингу дозволяє використання наземних систем моніторингу. Крім того, використання таких систем має значну економічну перевагу під час експлуатації устаткування.

Зазначені комплекси розробляються в різних країнах. У Великобританії використовується радіолокатор «Siemens Plessey 45C». У Німеччині використовуються радіолокатори «DWD». Також існують МРЛ італійського виробництва («ALENIA-SMA» та «EEC-ERICSSON») та виробництва Японії (марка «Mitsubishi») [132].

Найбільш ефективними засобами моніторингу зони забруднення та метеорологічної обстановки, які дозволяють усунути недоліки роботи космічної та наземної систем моніторингу, є літальні апарати. При цьому найбільш перспективними є безпілотні літальні апарати (БПЛА) (рис. 4.6).

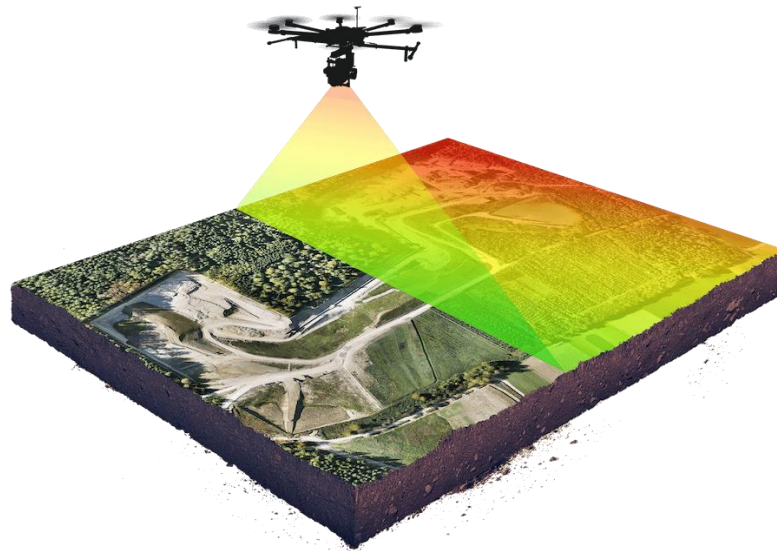


Рис. 4.6. Сучасні принципи використання БПЛА для розвідки зони НС

Найбільший потенціал серед засобів моніторингу мають безпілотні літальні апарати (БПЛА) [133-135]. Апарати такого типу можуть нести до 10 кг корисного навантаження, що дозволяє використовувати досить широкий спектр контрольно-вимірювального устаткування.

БПЛА бувають літакового та вертолітного типів. Кожен тип має свої переваги та недоліки, які й визначають специфіку їхнього використання для моніторингу надзвичайних ситуацій. БПЛА літакового типу можуть бути використані для моніторингу хімічної обстановки. У цьому випадку реалізуються такі якості даного типу БПЛА, як висока швидкість та дальність польоту (відповідно більша площа моніторингу), при цьому дані характеристики не знижують якість хімічного контролю.

Вантажопідйомність БПЛА вертолітного типу вище, ніж літакового, та досягає п'яти десятків кілограм корисного навантаження. Це дає можливість

використовувати досить потужну приладову базу. Для цілей моніторингу хімічного забруднення можуть застосовуватися компактні лідарні комплекси. Лідарні комплекси оснащуються набором випромінювачів у широкому спектральному діапазоні випромінювання (від ультрафіолетового до далекого інфрачервоного).

Аерозольний лідар визначає місце розташування та відслідковує еволюцію природних та штучних аерозольних утворень в атмосфері, а також оцінює характерний розмір часток. Поляризаційний лідар досліджує їх агрегатний стан та фізичну структуру (тверді або рідкі). DIAL вимірює концентрацію в атмосфері ізотопів йоду, які можуть використовуватися для контролю рівня радіаційного забруднення. Лідар з виміру повітряних турбулентностей дозволяє прогнозувати напрямок та швидкість поширення хмари забруднення. Використання інфрачервоного лідара дозволяє визначати зону горіння у випадку ліквідації природних пожеж. Для більш точного визначення хімічної природи небезпечних газів можна застосовувати Фур'є-спектрометр.

Якщо проаналізувати складові частини методики прогнозування рівня хімічного ураження атмосфери при активному осадженні небезпечних газів, то можна прийти до висновку, що ця методика є складовою частиною загального циклу кризового управління (рис. 4.7).

Як видно із рис. 4.7, перші два блоки циклу кризового управління повністю відносяться до методу прогнозування. Вибір визначальних критеріїв за якими проводиться прогнозування робить окрема персона або колективний орган, який має керівні повноваження. Тобто керівний орган визначає за яких умов та на який час розвитку аварії проводиться прогнозування.

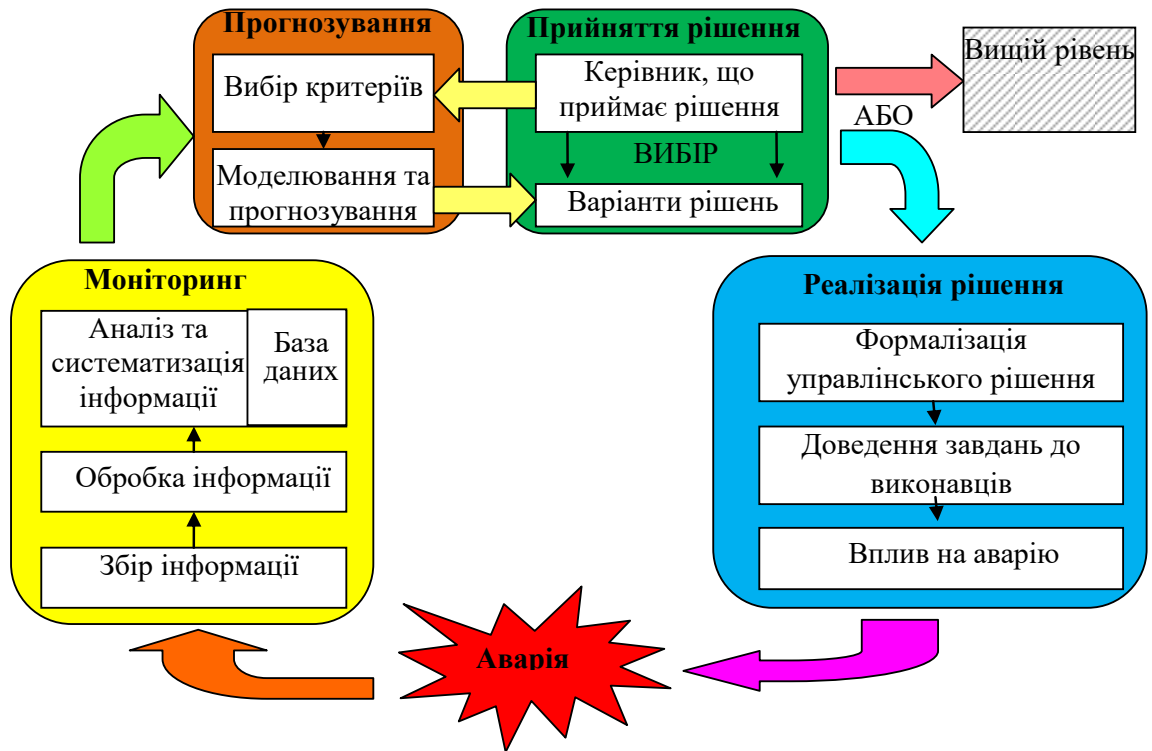


Рис. 4.7. Структура кризового управління при ліквідації аварії

Ефективним підходом є одночасне прогнозування за декількома варіантами розвитку ситуації. Це дає змогу керуючому органу оцінити наслідки різних управлінських рішень та обрати оптимальне рішення. Доцільним є використання саме автоматизованих систем прогнозування зони ураження [136-138] (рис. 4.8).

Однак особа, що проводить прогнозування повинна знати переваги та недоліки кожного програмного комплексу та певні обмеження, які закладені в алгоритми розрахунку.

Далі керуючий орган ставить задачі по реагуванню на аварію перед виконавцями при наявності відповідних ресурсів. Передчасне та якісне прогнозування наслідків аварії дозволяє заздалегідь визначити потреби в ресурсах людей, технічних та матеріальних ресурсах. При потребі додаткові ресурси керівний орган може запросити у вищій ланки управління.

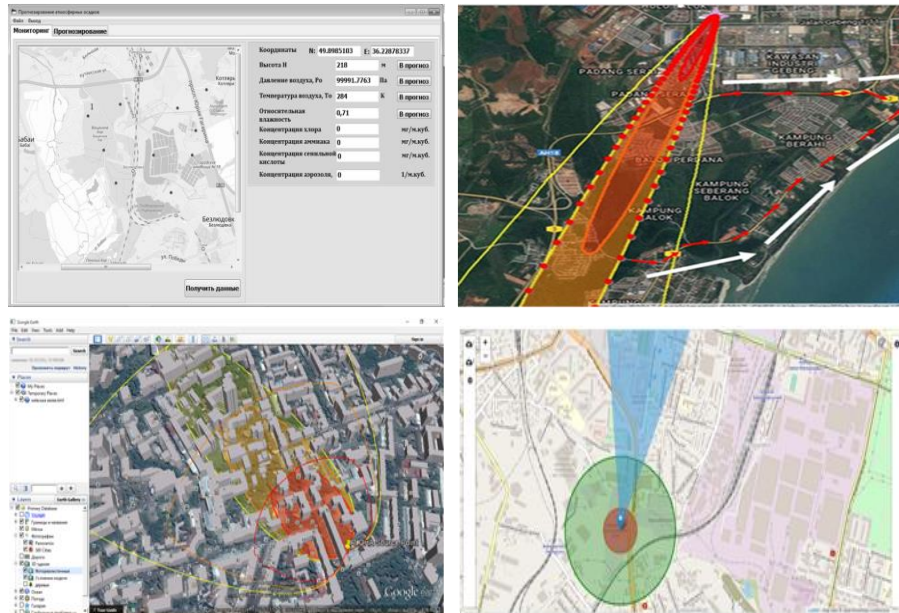


Рис. 4.8. Приклади результатів прогнозування різними програмними комплексами

Після активного впливу на зону аварії змінюються вхідні параметри для наступного етапу прогнозування. Тому моніторинг зони надзвичайної ситуації проводиться безперервно під час всього процесу ліквідації наслідків аварії. Наступний етап прогнозування розвитку аварії з уточненими моніторинговими даними дозволяє оцінити керівнику правильність прийнятих управлінських рішень та якість виконання поставлених задач рятувальним службам. При необхідності проводиться корегування елементів ліквідації наслідків надзвичайної ситуації.

Отриманні математичні моделі можуть бути використані для двох видів прогнозування – попереднього та аварійного.

Попереднє прогнозування проводиться до виникнення аварійного викиду небезпечних газів. Умовами для такого прогнозування виступають найбільш ймовірні умови гіпотетичної аварії. Попереднє прогнозування використовується як для потреб інженерного проектування так і для планування дій екстрених служб.

При інженерному проектуванні попереднє прогнозування використовується для визначення необхідної інтенсивності водяних завіс на

виходах із технологічних приміщень де виготовляються, зберігаються та використовуються небезпечні речовини. Прикладом такого проектування є проектування складу для зберігання хлору на водоочисних підприємствах.

Також попереднє прогнозування використовується для визначення безпечних відстаней забудови хімічно небезпечних об'єктів, норм забудови житлових будинків у індустріальному районі та розміщенні технологічних приміщень на території підприємства.

Іншим напрямком застосування довгострокового прогнозування розмірів зони хімічного ураження є складання планів реагування на аварійні ситуації різних рятувальних служб. Зазвичай складанням цього плану займаються спеціальні відділи цивільного захисту у місцевих органах влади. Потім такі плани погоджуються із усіма оперативно-рятувальними службами, що можуть бути задіяні на ліквідацію наслідків надзвичайної ситуації. Такий план є керуючим документом для аварійного штабу при організації взаємодії різних підрозділів в зоні надзвичайної ситуації.

Аварійне прогнозування проводиться для оперативного передбачення розвитку аварії, що вже трапилась. Вихідними умовами для такого прогнозування є моніторингові дані, що зібрані під час розвідки місця виникнення аварії (рис. 4.1). Аварійне прогнозування проводиться працівниками оперативного штабу на місці аварії. Отримані за математичними моделями результати використовуються для визначення кількості рятувальних підрозділів, що необхідно задіяти для осадження хмари небезпечного газу та безпечних відстаней роботи рятувальників в зоні аварії. Для цивільного населення результати розрахунку використовується для визначення кількості персоналу та населення, що потребують оперативної евакуації.

Запропонована методика дозволяє підвищити оперативність та зручність роботи штабу по ліквідації надзвичайних ситуацій та безпеку роботи рятувальників в зоні викиду небезпечних речовин. Також

запропонована методика дозволяє заздалегідь планувати евакуацію населення, що може опинитися в небезпечних умовах.

Необхідно відмітити, що запропонована методика прогнозування рівня хімічного ураження атмосфери при активному осадженні небезпечних газів має суттєве обмеження, яке обумовлене припущенням про повне перекриття хмари водяними струменями. Тобто використання розробленої методики доцільне для хмар з шириною до 20 метрів та висотою не більше 10 метрів, що відповідає характеристикам струменів із рятувального обладнання. Недоліком розробленої моделі є неможливість її коректного використання для хмар більшого розміру. Для усунення цього недоліку наступні дослідження слід орієнтувати на фрагментацію зони ураження на окремі ділянки з різними умовами осадження.

Таким чином, розроблена загальна система організації процесу ліквідації надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів, яка включає проведення моніторингу для визначення вхідних параметрів, математичний апарат для розрахунків концентраційного розподілу небезпечних газів та процедуру практичної реалізації розробленого методу прогнозування в загальній системі цивільного захисту. Виходячи з характеристик струменів, що можна отримати за допомогою рятувального обладнання, використання розробленої методики доцільне для хмар з шириною до 20 метрів та висотою не більше 10 метрів. Запропонована багаторівнева система моніторингу, яка включає технічні елементи збору, обробки та передачі даних. Інтеграція запропонованої методики в загальну структуру управління при ліквідації надзвичайних ситуацій дозволяє проводити оцінку безпеки при реальних умовах локалізації викиду. Підвищення точності та оперативності оцінки небезпек за допомогою запропонованої методики дозволить підвищити безпеку роботи рятувальників в зоні аварії та заздалегідь організувати проведення евакуації населення із зони надзвичайної ситуації.

4.2. Рекомендації керівникам ліквідації надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів

При розробці практичних рекомендацій керівникам ліквідації надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних речовин спирались на основні керуючі та нормативні документи ДСНС України, що регламентують роботу рятувальників в зоні хімічного забруднення. Дії оперативно-рятувальних підрозділів в зоні НС регламентуються Статутом дій у НС органів управління та підрозділів ОРС ЦЗ та Статутом дій органів управління та підрозділів ОРС ЦЗ під час гасіння пожеж [139]. Особливості забезпечення безпечної роботи рятувальників та організації успішної ліквідації НС з викидом небезпечних хімічних речовин регламентуються у Рекомендаціях щодо організації гасіння пожеж підрозділами МНС на промислових об'єктах підвищеної небезпеки з наявністю небезпечних хімічних речовин [140] та у Методичних рекомендаціях щодо режимів робіт о/с підрозділів ОРС ЦЗ у засобах індивідуального захисту у зонах хімічного та радіаційного забруднення [141].

Під час аварії існує декілька факторів ураження: пожежі, вибухи, хімічне забруднення повітря та місцевості, а за межами об'єкта – забруднення навколишнього середовища. Аварії з викидом небезпечних речовин характеризуються високою швидкістю утворення та дії шкідливих агентів. Заходи щодо захисту людей і населення, локалізації та ліквідації наслідків аварії здійснюються в найкоротші терміни.

По дорозі до місця надзвичайної події керівник підрозділу через оперативно-диспетчерську службу визначає очікувані межі хімічного зараження, характеристики шкідливих хімічних речовин, зону безпеки та віддає особовому складу розпорядження щодо застосування засобів індивідуального захисту та застосування хімічної розвідки. пристроїв.

До проведення аварійно-рятувальних робіт працівники допускаються лише після ознайомлення з питаннями охорони праці, що проводяться акредитованими інженерно-технічними працівниками об'єкта, та надання

письмового дозволу із зазначенням робочого місця, їх змісту та техніки безпеки.

Пожежно-рятувальні підрозділи, які виїжджають на ліквідацію надзвичайних ситуацій з пуском ЯПР, повинні мати хімічні сповіщувачі та засоби індивідуального захисту персоналу [142].

Пожежно-рятувальні підрозділи прибувають до місця аварійної розчистки з боку вітру. У разі неможливості під'їзду з навітряного боку транспортний засіб слід розмістити на безпечній відстані від можливих зон хімічного зараження.

З метою оцінки ситуації та прийняття рішення щодо організації оперативних дій в зоні НС з моменту виїзду пожежно-рятувального підрозділу до ліквідації аварії проводиться розвідка зони НС.

Алгоритм дій керівника ліквідації НС з викидом НХР:

1. Провести розвідку на місці викиду НХР.
2. Вжити заходів щодо рятування та евакуації людей.
3. Визначити межі зони хімічного забруднення.
4. Утворити Штаб з ліквідації НС, включити до його складу представників адміністрації об'єкта (органу місцевого самоврядування).
5. Призначити відповідального за безпеку праці для здійснення контролю за дотриманням особовим складом заходів безпеки.
6. Поінформувати диспетчерську службу (оперативно-координаційний центр) про обстановку за результатами розвідки, запросити, за необхідності, додаткові сили та засоби (спеціалізовані формування та підрозділи).
7. Визначити за погодженням з фахівцями об'єкта речовину для осадження хмари небезпечного газу та способи її застосування, враховуючи можливості її взаємодії з НХР та наслідки цієї взаємодії.
8. Визначити позиції ствольників і місця для розстановки пожежно-рятувальної техніки (з навітряної сторони).

9. Визначити допустимий час перебування особового складу в забрудненій зоні.

10. Організувати осадження хмари НХР та захист технологічного обладнання із залученням мінімально необхідної кількості особового складу, захищеного індивідуальними засобами захисту.

11. В умовах реальної загрози життю та здоров'ю людей, одночасно з розгортанням сил та засобів, викликати швидку медичну допомогу.

12. Створити необхідний резерв сил і засобів, організувати його розміщення за межами зон хімічного забруднення на безпечній відстані з урахуванням прогнозованої зміни розмірів і напрямку розповсюдження зон.

13. Організувати проведення аварійними службами, спеціальними формуваннями чи підрозділами хімічного захисту постійної хімічної розвідки та контролю за обстановкою на місці ліквідації НС.

14. Організувати через представників адміністрації об'єкта (органу місцевого самоврядування) пункти медичної допомоги, харчування і відпочинку особового складу, визначити місце проведення дегазації особового складу і техніки.

15. Організувати після ліквідації НС проведення повної або часткової санітарної та спеціальної обробки особового складу, його медичного огляду, дегазацію техніки, обладнання і спорядження, що використовувалося [143].

Під час спостереження за зоною НС старший черговий виявляє інформацію про наявність постраждалих, стан, вид, кількість і характеристики небезпечних НХР, напрямок і швидкість вітру [144].

Розвідку необхідно проводити тільки в засобах індивідуального захисту з використанням відповідних приладів. Розвідка може проводитись як пішим порядком так і з використанням спеціальної техніки (УАЗ-469 РХ, БРДМ2РХ) (рис. 4.9). Межі зон хімічного зараження позначаються спеціальними знаками.



Рис. 4.9. Способи проведення хімічної розвідки.

Під час розвідки визначається:

- наявність, кількість і місця перебування людей, які знаходяться в зоні пожежі або поруч з об'єктом і можуть потрапити до зони хімічного забруднення, а також порядок проведення їх евакуації в безпечні місця;
- вид і кількість НХР, які знаходяться в зоні пожежі або можуть до неї потрапити, їх основні фізико-хімічні, пожежовибухонебезпечні та токсичні властивості;
- наявність, кількість та місця знаходження речовин, що здатні інтенсивно взаємодіяти з водою та іншими вогнегасними речовинами;
- місця викиду (витоку) НХР, характер і зони хімічного забруднення;
- загрозу вибуху, руйнування та деформації конструкцій, технологічного обладнання, комунікацій, резервуарів тощо;
- загрозу переходу вогню чи поширення НХР до сусідніх цехів, установок;
- можливість викиду небезпечних хімічних та радіоактивних речовин;
- наявність та стан систем протиаварійного і протипожежного захисту технологічного обладнання, запірної і дихальної арматури резервуарів, ємностей тощо;
- вид і кількість спеціальних засобів гасіння пожежі на об'єкті, можливість їх застосування;

- засоби захисту, місця укриття особового складу та техніки на випадок вибуху, викиду НХР тощо.

Процес ліквідації аварії на хімічно небезпечних об'єктах з викидом шкідливих речовин включає [145]:

- розвідку осередку ураження з метою встановлення характеру руйнувань, типу хімічної речовини та її небезпечних концентрацій, межі зони забруднення, напрямку та швидкості розповсюдження небезпечних хімічних речовин, строку дії джерела забруднення;

- своєчасне оповіщення працівників рятувальних служб про виникнення загрози ураження хімічно небезпечними речовинами об'єктів та населених пунктів, яким загрожує небезпека;

- локалізацію та ліквідація осередків ураження;

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

- надання домедичної допомоги постраждалим;

- евакуацію постраждалих до закладів охорони здоров'я;

- участь в евакуації населення в безпечні райони та його розміщення.

Керівник ліквідації НС дає наступні розпорядження задіяним підрозділам:

1. Підрозділам РХБ захисту:

- визначення меж хімічного забруднення в зоні НС на маршрутах слідування;

- визначення ділянок місцевості та об'єкти, що підлягають дегазації, порядок та способи дегазації;

- розміщення пунктів приготування дегазуючих розчинів та зарядки техніки;

- розгортання пункту спеціальної обробки;

- розгортання місць забору води для санітарно-технічних потреб; маршрут руху.

2. Аварійно-рятувальним підрозділам:

- визначає ділянки (об'єкти) робіт;
- визначає види, обсяги і строки проведення рятувальних та інших невідкладних робіт,
- визначає алгоритм евакуації постраждалих;
- визначає маршрути руху до осередку ураження.

Під час пошуку постраждалих пункти хіміконтролю проводять періодичний або постійний хімічний моніторинг поблизу району виникнення надзвичайної ситуації [146].

Пошук потерпілих ведеться переважно на робочих місцях, шляхах евакуації, на місцевості, починаючи з місць, розташованих поблизу вогнища аварії.

Якщо небезпечна хімічна речовина важча за повітря, то потерпілих шукають переважно в підвалах будівель і в підвалах, а також у низинних місцях території.

Якщо небезпечна хімічна речовина легша за повітря, то пошук постраждалих ведеться переважно на верхніх поверхах.

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

З урахуванням специфіки хімічних аварій при локалізації і ліквідації їх наслідків вживаються заходи, які спрямовані спочатку на обмеження і призупинення виліву (викиду) НХР, локалізації хімічного ураження, запобігання зараженню ґрунту і джерел водозабезпечення населення. Обмеження і призупинення викиду (виліву) НХР здійснюється:

- перекриттям кранів і засувок на магістралях подачі НХР до місця аварії (рис. 4.10);



Рис. 4.10. Основні види запірної арматури на ємностях з НХР

- закриванням отворів на магістралях і резервуарах за допомогою бандажів (рис. 4.11);



Рис. 4.11. Закриванням отворів на резервуарах за допомогою бандажів

- закриванням отворів за допомогою гумових клинів (рис. 4.12);



Рис. 4.11. Комплекти клинів для герметизації ємностей

- перекачуванням НХР із аварійного резервуара в запасний (рис. 4.12);



Рис. 4.12. Системи перекачування НХР із пошкоджених ємностей

Ці роботи здійснюються під керівництвом і при безпосередній участі спеціалістів відповідної галузі, що обслуговують аварійне обладнання або супроводжують ХНР при транспортуванні. Зменшення розповсюдження НХР досягається створенням водяних завіс (рис. 4.13).



Рис. 4.13. Постановка водяних завіс для локалізації викиду НХР

Повідомлення про факт аварії має бути надіслано в усі населені пункти та об'єкти господарської діяльності, розташовані на шляху руху забрудненої хмари НХР і в межах обмеженої території радіусом, що дорівнює максимально можливій глибині поширення хмари НХР за певних умов. метеорологічні умови. Основним способом оповіщення населення про дії населення при аварії в ХНО з викидом НХР є передача повідомлення по

магістральних мережах мовлення (по вуличних і квартирних гучномовцях), а також по місцевому радіо і телевізійним станціям. Для привернення уваги населення спрацьовують сирени, а також інші сигнальні засоби, сигнал яких означає «увага всім». Мешканці, почувши такий сигнал, мають негайно увімкнути гучномовець, радіо чи телебачення та прослухати повідомлення про подальші дії.

Для локалізації хімічного забруднення та запобігання поширенню НХР на поверхню ґрунтів і водойм можна використовувати різні методи. Розлив НХР на території з метою зменшення площі випаровування здійснюється шляхом перегородження дамбами, створення перешкод на шляху розливу, збирання НХР у природних заглибленнях (шурфи, траншеї, траншеї), спеціальним обладнанням уловлювачів. При проведенні робіт необхідно, перш за все, не допустити виходу НХР до річок, озер, підземних комунікацій, підвалів будівель, споруд тощо. Роботи можна проводити за допомогою бульдозерів, скреперів, екскаваторів та іншої техніки. У деяких випадках рідку фазу НХР можна збирати в спеціальні контейнери (бочки), щоб зменшити розлив.

Підрозділи РХБ захисту разом з пожежно-рятувальними та інженерно-технічними підрозділами проводять дегазацію місцевості, виробничих територій, споруд і обладнання, забруднених хімічно небезпечними речовинами.

Прийняття управлінського рішення керівником ліквідації аварії повинно базуватись на оцінках ризиків для рятувальників та населення.

Оцінка ризику аварії проводиться шляхом визначення ймовірності та вагомості наслідків реалізації небезпек аварій для здоров'я людини, майна і довкілля.

Для оцінки можливих наслідків визначаються:

- еквівалентна кількість речовини в первинній і вторинній хмарі;
- площа і глибина зон зараження;
- концентрація шкідливих домішок в атмосфері;

- час підходу до виділеного об'єкта або регіону;
- інші параметри, що характеризують небезпечний вплив шкідливих і токсичних речовин, необхідні для оцінки наслідків.

Територіальний ризик у певній точці зони аварії k та період часу t з викидом небезпечних хімічних речовин може визначатись як:

$$R_t^k = P_p \cdot P_{in} \cdot P_l, \quad (4.1)$$

де P_p – ймовірність потрапляння людини в зону викиду небезпечного газу; P_{in} – ймовірність отруєння важкого нелетального отруєння людиною; P_l – ймовірність летального результату для людини у випадку її перебування в зоні аварії.

За результатами розрахунків визначається можливе число потерпілих, у т. ч. з летальним наслідком. Для цього порівнюють розрахункові данні зі значенням прийняттого ризику, тобто такого ризику, який не перевищує гранично допустимого рівня, визначеного «Методикою визначення ризиків та їх прийнятних рівнів для декларування безпеки об'єктів підвищеної небезпеки» (Наказ Міністерства праці та соціальної політики України № 637 від 04.12.2002 р.)

Крім цього на хімічно небезпечному об'єкті та у керівника ліквідації аварії повинна бути детальна інформація щодо негативного впливу небезпечної речовини, яка викидається. На прикладі амміака така карта може містити таку інформацію:

«Аміак — безбарвний газ із гострим дратівливим запахом (нашатирного спирту), їдкий, легший за повітря. В атмосфері утворює холодну білу туманну хмару, яка тримається біля поверхні землі. При зігріванні газова хмара піднімається. Аміак починає взаємодіяти відразу і після контакту з вологою на поверхні шкіри, очей, рота, слизових поверхонь утворює їдку речовину, що веде до некрозу тканин. Тому що **аміак легший**

за повітря, для захисту необхідно використовувати укриття, підвали та нижні поверхи будинків.

Симптоми отруєння аміаком:

- Перші ознаки отруєння аміаком такі: печіння в носі, горлі, дихальних шляхах, що може спричинити дихальну недостатність через набряк та ураження дихальних шляхів. Через різкий запах аміаку його присутність досить легко помітити, проте аміак призводить до послаблення нюху, через що речовину можна і не помітити у повітрі.

- Діти можуть більше страждати через аміак, оскільки поверхня їх легень більша до всього тіла, ніж у дорослих. Через менше зростання, ніж у дорослих, вони знаходяться ближче до землі, де концентрація аміаку вища

- При контакті зі шкірою, очима, аміак викликає спочатку роздратування, при вищій концентрації – опіки шкіри, ураження очей аж до сліпоті. Причому ступінь ураження ока який завжди можна визначити протягом тижня після контакту з аміаком.

- При отриманні високої концентрації аміаку при вживанні їжі можна отримати пошкодження рота, горла, шлунка.

- Певного протитотрути проти отруєння аміаком немає, але зменшити його вплив можна.

Правила поведінки в умовах викиду (випливу) аміаку:

- виходити із зараженого району необхідно перпендикулярно напрямку вітру;
- якщо немає можливості вийти з району зараження, необхідно укритися в укриттях, підвалах, квартирах (будинках), попередньо загерметизувавши вікна, двері, вентиляцію (бажано тканиною, змоченою в лимонній кислоті або слабкому розчині оцту чи води);
- в помешканні бажано пройти до ванної кімнати та включити душ на мілке розпилення (вода поглинає аміак із повітря), вентиляцію не вмикати (витягує чисте повітря та затулює забруднене);
- якщо відчуваєте запах аміаку, дихати через зволожену марлеву

пов'язку (бажано змочити 5% розчином оцтової або лимонної кислоти).

Перша допомога при отруєнні аміаком:

- виведіть ураженого на свіже повітря;
- дайте йому теплого молока з харчовою содою;
- одягніть ватно-марлеву пов'язку, змочену водою, краще 5% розчину оцтової або лимонної кислоти;
- при потраплянні в очі — промийте водою або протріть вазеліном чи оливковою олією;
- при ураженні шкіри — обмийте чистою водою, зробіть примочки з 5% розчину оцтової або лимонної кислоти.»

Після проведення аварійно-рятувальних робіт в осередку хімічного забруднення підрозділи 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.

Таким чином, розроблено практичні рекомендації для керівників ліквідації надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних хімічних речовин. Запропоновано алгоритм дій з організації аварійно-рятувальних робіт на ХНО, який передбачає проведення таких основних етапів ліквідації НС, як проведення розвідки, локалізація викиду НХР, рятування людей, проведення евакуації та дегазація особового складу та техніки. Детальні рекомендації дозволяють використовувати отримані в роботі нові результати в практичних підрозділах ДСНС з метою підвищення ефективності ліквідації надзвичайних ситуацій з викидом НХР.

Висновки по розділу 4.

1. Розроблена загальна система організації процесу ліквідації надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів, яка включає проведення моніторингу для визначення вхідних параметрів, математичний апарат для розрахунків концентраційного розподілу небезпечних газів та процедуру практичної реалізації розробленого методу прогнозування в загальній системі цивільного захисту. Виходячи з характеристик струменів, що можна отримати за допомогою рятувального обладнання, використання розробленої методики доцільне для хмар з шириною до 20 метрів та висотою не більше 10 метрів. Запропонована багаторівнева система моніторингу, яка включає технічні елементи збору, обробки та передачі даних. Інтеграція запропонованої методики в загальну структуру управління при ліквідації надзвичайних ситуацій дозволяє проводити оцінку безпеки при реальних умовах локалізації викиду. Підвищення точності та оперативності оцінки небезпек за допомогою запропонованої методики дозволить підвищити безпеку роботи рятувальників в зоні аварії та заздалегідь організувати проведення евакуації населення із зони надзвичайної ситуації.

2. Розроблено практичні рекомендації для керівників ліквідації надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних хімічних речовин. Запропоновано алгоритм дій з організації аварійно-рятувальних робіт на ХНО, який передбачає проведення таких основних етапів ліквідації НС, як проведення розвідки, локалізація викиду НХР, рятування людей, проведення евакуації та дегазація особового складу та техніки. Детальні рекомендації дозволяють використовувати отримані в роботі нові результати в практичних підрозділах ДСНС з метою підвищення ефективності ліквідації надзвичайних ситуацій з викидом НХР.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено важливу науково-практичну задачу у галузі цивільного захисту, а саме: розроблено методика прогнозування хімічної обстановки при аваріях з викидом небезпечних газів в інтересах підвищення ефективності реагування на надзвичайні ситуації з викидом небезпечних хімічних речовин із врахуванням активного осадження хмари небезпечної речовини з атмосферного повітря.

За підсумками виконаної наукової роботи зроблено наступні висновки:

1. Виконано аналіз нормативної бази України з питань ліквідації надзвичайних ситуацій техногенного характеру, у тому числі на хімічно небезпечних об'єктах, який показав що правові основи для створення системи ліквідації надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних речовин на хімічно небезпечних об'єктах закріплені в законах та інших підзаконних актах, які ґрунтуються на міжнародній правовій базі. Проведено аналіз статистики виникнення та протікання процесу ліквідації надзвичайних ситуацій в Україні та інших країнах світу, який показав що переважною причиною виникнення надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних хімічних речовин є людський фактор та зношення обладнання, а основною характеристикою таких аварій є швидке розповсюдження зони ураження на велику площу. Визначено, що нові методи та системи ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних хімічних речовин необхідно реалізовувати в рамках функціонування в Україні Єдиної державної системи цивільного захисту на основі класичного контуру управління. Проведено аналіз різних підходів до прогнозування зон хімічного забруднення. Як свідчить аналіз основною тенденцією розвитку систем прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій є автоматизація процесу розрахунку та інтеграція картографічних додатків до програмного комплексу, однак на даний час не існує методик прогнозування наслідків аварій з викидом

небезпечних хімічних речовин, який здатен враховувати процеси осадження небезпечних газів з атмосферного повітря дисперсними потоками.

2. Розроблено методику прогнозування хімічної обстановки при аваріях з викидом небезпечних газів, яка базується на математичній моделі розповсюдження небезпечного газу в атмосферному повітрі при його активному осадженні водними аерозолями та алгоритмі її використання. Розроблена математична модель розповсюдження небезпечного газу в атмосферному повітрі при його активному осадженні водними аерозолями дозволяє підвищити точність розрахунків розподілу концентрації газу в атмосферному повітрі при роботі стаціонарних та пересувних систем аерозольного осадження. Розроблена математична модель є системою із трьох рівнянь. Перше рівняння описує процес вільного розповсюдження газу після викиду із технологічного обладнання. Друге рівняння описує процес осадження газу із атмосферного повітря дрібнодисперсним рідинним потоком з різною інтенсивністю. Третє рівняння описує процес вільного розсіювання газу в атмосферному повітрі після осадження. За допомогою комп'ютерного моделювання перевірена працездатність розробленою математичної моделі. Використання при моделюванні методу скінчених різниць дозволяє отримувати числові рішення просторового розподілу концентрації газу при його осадженні струменем довільної інтенсивності та форми. Запропонований метод математичного опису процесу сорбції небезпечних газів дозволяє обирати довільну кількість та просторове розміщення вузлових точок, які задовольняють умові Куранта-Фрідріхса-Леві. Розроблено керуючий алгоритм методики прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів, який базується на послідовності трьох блоків – моніторингу зони надзвичайної ситуації, прогнозування наслідків надзвичайної ситуації та прийняття управлінського рішення.

3. Проведено експериментальну перевірку достовірності розроблених моделей та ефективність розробленої методики на їх основі. Для цих цілей

розроблено експериментальну камеру для дослідження сорбції газів, яка дозволяє досліджувати динаміку газових потоків різної інтенсивності під впливом дисперсного рідинного потоку. Можливості дослідження сорбційних процесів забезпечуються для швидкості повітряного потоку в діапазоні від 0 до 6 м/с та дисперсності рідинного потоку до 0,1 мм. Проведені на експериментальній камері дослідження просторового розподілу аміаку при різній інтенсивності повітряного потоку та різній інтенсивності дисперсного потоку води при осадженні підтвердили високу інтенсивність сорбції аміаку водою, що дозволило знизити концентрацію газу у 15-17 разів. Визначено, що для газів з низьким коефіцієнтом Генрі $H < 0,05 \text{ моль} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{Па}^{-1}$ доцільним є використання хімічних нейтралізаторів для підтримання високої інтенсивності осадження газів з атмосферного повітря. Результати експериментальних досліджень розраховані з надійністю 0,95 за критерієм Фішера, що засвідчує достовірність розроблених моделей та методики. Встановлено, що використання запропонованої методики прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів, яка передбачає виконання трьох процедур, дозволяє підвищити точність прогнозування зони хімічного ураження без осадження на 16% та при активному осадженні у 4 рази. На практичному прикладі показано, що запропонована методика дозволяє суттєво підвищити ефективність ліквідації хімічних аварій за рахунок більш інтенсивного осадження при мінімізації безпечної відстані для рятувальників та оптимізації інтенсивності подачі дисперсного потоку.

4. Розроблена загальна система організації процесу ліквідації надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів, яка включає проведення моніторингу для визначення вхідних параметрів, математичний апарат для розрахунків концентраційного розподілу небезпечних газів та процедуру практичної реалізації розробленого методу прогнозування в загальній системі цивільного захисту. Межі використання розробленої методики визначені для хмар з шириною до 20 метрів та висотою не більше 10 метрів.

Інтеграція запропонованої методики в загальну структуру управління при ліквідації надзвичайних ситуацій дозволяє проводити оцінку небезпеки при реальних умовах локалізації викиду. Підвищення точності та оперативності оцінки небезпек за допомогою запропонованої методики дозволить підвищити безпеку роботи рятувальників в зоні аварії та заздалегідь організувати проведення евакуації населення із зони надзвичайної ситуації. Розроблено практичні рекомендації для керівників ліквідації надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних хімічних речовин.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Oggero A., Darbra R. M., Munoz M., Planas E., Casal J. A survey of accidents occurring during the transport of hazardous substances by road and rail. *Journal of hazardous materials*. 2006. № 133(1-3). P. 1-7.
2. 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. № 1/10 (97). P. 29–35.
3. Poluyan L. V., Syutkina E. V., Guryev E. S. Software systems for prediction and immediate assessment of emergency situations on municipalities territories. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017. № 262 (1). P. 012199
4. Pospelov B., Rybka E., Meleshchenko R., Krainiukov O., Harbuz S., Bezuhla Yu., Morozov I., Kuruch A., Saliyenko O., Vasylychenko R. Use of uncertainty function for identification of hazardous states of atmospheric pollution vector. *Eastern-European Journal of Enterprise*. 2020. № 2/10 (104). P. 6–12.
5. Dadashov I., Loboichenko V., Kireev A. Analysis of the ecological characteristics of environment friendly fire fighting chemicals used in extinguishing oil products. *Pollution Research*. 2018. № 37(1). P. 63–77.
6. Semko A. N., Beskrovnaya M. V., Vinogradov S. A., Hritsina I. N., Yagudina N. I. The usage of high speed impulse liquid jets for putting out gas blowouts. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 2014. № 52(3). P. 655-664.
7. Говаленков С. С., Басманов А. Е. Оценка интенсивности истечения опасных химических веществ из источника выброса. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2010. Вип. 11. С. 39–44.
8. Каменева І.П., Попов О.О. Математичне моделювання розповсюдження забруднення в атмосфері на основі розв'язку рівняння турбулентної

- дифузії. *Сборник трудов конференции «Моделирование – 2008»*. К. : ИПМЕ ім. Г.Є Пухова НАН України, 2008. Т. 2. С. 602–607.
9. Ивлев Л. С., Довгалюк Ю. А. Физика атмосферных аэрозольных систем. СПб.: НИИХ СПбГУ. 1999. 194 с.
 10. Kustov M., Kalugin V., Levterov A. Rain scavenging of a radioactive aerosol atmospheric precipitation. *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*, Vienne. 2016. № 3–4. P. 73–76.
 11. Алоян А. Е. Динамика и кинетика газовых примесей и аэрозолей в атмосфере. М.: ИВМ РАН. 2002. 201 с.
 12. Crowley J. N., Ammann M., Cox R. A. et al. Wallington Evaluated kinetic and photochemical data for atmospheric chemistry: Volume V – heterogeneous reactions on solid substrates. *Atmos. Chem. Phys.* 2010. № 10. P. 9059–9223
 13. 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.
 14. 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. *J. Phys. Chem. A.* 2013. № 117. P. 410 – 420.
 15. 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.
 16. Кустов М. В., Басманов О. Є., Мельниченко А. С. Моделювання зони хімічного ураження в умовах локалізації надзвичайної ситуації. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. Харків, 2020. Вип. 32. С. 142–157.
 17. Кустов М. В., Басманов О. Є., Тарасенко О. А., Мельниченко А. С. Прогнозування масштабів хімічного ураження за умов осадження небезпечної речовини. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. Харків, 2021.

Вип. 33. С. 72–83.

18. 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. Volume 1 (10 (115)). P. 31–40. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.251675>
19. Кустов М. В., Мельниченко А. С. Експериментальна перевірка моделі розповсюдження небезпечних газів при їх осадженні. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. Харків, 2022. Вип. 35. С. 48–62.
20. Kustov M.V., Melnychenko A.S., Taraduda D.V., Korogodska A.M. Research of the chlorine sorption processes when its deposition by water aerosol. *Scientific journal «Materials Science Forum» Switzerland: Trans Tech Publications Ltd*, 2021. Volume 1038. P. 361-373.
21. Kustov M., Melnychenko A., Basmanov O., Tarasenko O. Modeling of gas sorption process by dispersed liquid flow. *Scientific journal «Materials Science Forum» Switzerland: Trans Tech Publications Ltd*, 2022. Volume 1068. P. 239-247. <https://doi.org/10.4028/p-jdydlo>
22. Мельниченко А. С., Кустов М. В. Моделювання зони хімічного ураження в умовах локалізації надзвичайної ситуації. *The 11th International scientific and practical conference “Eurasian scientific congress”* Barca Academy Publishing, м. Барселона, 3 листопада 2020 р. С. 24–31.
23. Мельниченко А. С., Кустов М. В. Розрахунок зони хімічного зараження при розливі НХР із залізничної цистерни. *Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту: матер. Міжнародної науково-практичної конференції*, м. Харків, НУЦЗУ, 27 лютого 2020 р. С. 87.
24. Мельниченко А. С., Кустов М. В. Аналіз причин виникнення надзвичайних ситуацій на об'єктах зберігання хлору. *Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту: матер. Міжнародної науково-практичної конференції*, м. Харків, НУЦЗУ, 27 лютого 2020 р.

С. 86.

25. Мельниченко А. С., Кустов М. В. Розв'язання рівняння розповсюдження небезпечних хімічних речовин у просторі при його осадженні. Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту: матер. Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, м. Харків, НУЦЗУ, 16 квітня 2021 р. С. 408.
26. Мельниченко А.С., Кустов М.В. Вплив хімічної нейтралізації небезпечного газу на швидкість його осадження. Проблеми надзвичайних ситуацій: матер. Міжнародної науково-практичної конференції, м. Харків, НУЦЗУ, 20 травня 2021 р. С. 202.
27. Мельниченко А. С., Кустов М. В. Основні причини виникнення аварійних ситуацій, що супроводжуються витоком хлору. Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту: матер. круглого столу «Суб'єкти забезпечення цивільного захисту (регіонального та місцевого рівня) в реалізації завдань із запобігання та ліквідації наслідків НС», м. Харків, НУЦЗУ, 26 лютого 2021 р. С. 81.
28. Мельниченко А. С., Кустов М. В. Прогнозування розмірів зони хімічного ураження за допомогою пакету математичних програм MAPLE. Безпека людини у сучасних умовах: Зб. наук. праць XIII Міжнародної науково-методичної конференції, 147 Міжнародної наукової конференції Європейської Асоціації наук з безпеки (EAS), м. Харків, НТУ "ХПІ", 03 грудня 2021 р. С. 78.
29. Мельниченко А. С. Технологія локалізації та знезараження парогазової фази хмари НХР. Матер. круглого столу (вебінару) «Запобігання надзвичайним ситуаціям та їх ліквідація», м. Харків, НУЦЗУ, 23 лютого 2022 р. С. 177.
30. Мельниченко А. С., Кустов М. В. Принцип роботи камери для дослідження процесів сорбції газів. Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності : Зб. наук. праць XVII Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених, курсантів та

- студентів, м. Львів, ЛДУ БЖД, 04 березня 2022 р. С. 96.
31. Пат. №150432 України, МПК В01D 53/18 (2006.01) Камера для дослідження процесів сорбції газів / Кустов М.В., Мельниченко А.С., Слепужніков Є.Д., Чиркіна М.А., Хмиров І.М.; Демент М.О., Рагімов С.Ю. патентовласник: Національний університет цивільного захисту України. – № u202105395 від 16.02.2022.
 32. Постанова КМУ «Про затвердження Порядку класифікації надзвичайних ситуацій за їх рівнями № 368 від 24.03.2004». [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/368-2004-%D0%BF#Text>. (дата звернення 27.08.2022).
 33. Наказ Мін. Економ. Розвитку та торгівлі України № 17 від 11.01.2018 «Про затвердження Порядку розроблення національних класифікаторів». [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0124-18#Text> (дата звернення 27.08.2022).
 34. Національний класифікатор України. Класифікатор надзвичайних ситуацій ДК 019:2010. Київ, Держспоживстандарт. 2010. С. 4.
 35. Андронов В.А., Дівізінюк М.М., Калугін В.Д., Тютюнник В.В. Науково-конструкторські основи створення комплексної системи моніторингу надзвичайних ситуацій в Україні: Монографія. Х.: НУЦЗУ. 2016. 319 с.
 36. ДСТУ 3891:2013 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Терміни та визначення основних понять. Наказ від 14.10.2013 № 1231 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page?id_doc=57361 (дата звернення 27.08.2022).
 37. 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. 3(83). P. 13–25.
 38. Кодекс цивільного захисту України від 2 жовтня 2012 року № 5403-VI. Голос України. 2012. листопад (№ 220 (5470)). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/5403-17/page> (Last

accessed: 27.08.2022).

39. Кудинов В.А., Бабий Е.С., Кудинова А.В. Современные концепции глобальной экологической безопасности. Проб. Одес. Політех. ун-ту. 2012. Вип.1. С. 276–281.
40. Постанова Кабінету Міністрів України від 30.03.1998 року № 391 „Про затвердження Положення про державну систему моніторингу довкілля” [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/391-98-п> (дата звернення 27.08.2022).
41. Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» Відомості Верховної Ради України (ВВР), 1991, № 41, ст.546 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/1264-12> (дата звернення 27.08.2022).
42. Гранично допустимі концентрації хімічних речовин у ґрунті (ГДК). Діє від 1980-10-30. Наказ Міністерства охорони здоров'я СРСР № 2264. 12 с.
43. Данилов-Данильян В.И. Экология, охрана природы и экологическая безопасность. М.: МНЭПУ. 1997. 367 с.
44. Постанова Кабінету Міністрів України від 17.11.2001 № 1551 «Про утворення Міжвідомчої комісії з питань моніторингу довкілля» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/1551-2001-п> (дата звернення: 05.10.2018)
45. Наказ МНС України від 06 листопада 2003 року №425 «Про затвердження Положення про моніторинг потенційно небезпечних об'єктів» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/z1238-03>. (дата звернення: 22.08.2022)
46. Закон України «Про охорону атмосферного повітря» Відомості Верховної Ради України (ВВР), 1992, № 50, 678 с. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/2707-12> (дата звернення: 22.08.2022).

47. ДСТУ 4933:2008 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Техногенні надзвичайні ситуації. Терміни та визначення основних понять. Наказ від 26.03.2008 № 101. Держспоживстандарт України. Київ. 2008. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://dnaop.com/html/61574/doc-%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3_4933_2008 (дата звернення 27.08.2022).
48. Малишева Н.Р. Гармонізація екологічного законодавства в Європі. Київ, 1996. 148 с.
49. Власюк О. С., Прейгер Д. К. Проблеми міжнародного співробітництва України в галузі ядерної енергетики. *Стратегічна панорама*. 2008. № 1. С. 12 – 19.
50. Збірник нормативно-правових актів Європейського Союзу у сфері охорони навколишнього середовища. Львів, 2004. 192 с.
51. Blomquist Robert H. Rethinking the Citizen as Prosecutor Model of Environmental Enforcement: Some Overlooked Problems of Outcome. Independent Values. Georgia Law Review. 1988. 368 p.
52. Сушик О.В. Порівняльно-правовий аналіз забезпечення радіаційної безпеки у країнах СНД. Університетські наукові записки. 2014. Вип. 1(49). С. 112 – 119.
53. Zhang H., Duan H., Zuo J., Song M., Zhang Y., Yang B., Niu Y. Characterization of post-disaster environmental management for Hazardous Materials Incidents: Lessons learnt from the Tianjin warehouse explosion, China. J. Environ. Manag., 2017. Vol. 199. P. 21–30.
54. Nouriana R., Meysam Mousavi S., Raissia S. A fuzzy expert system for mitigation of risks and effective control of gas pressure reduction stations with a real application. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2019. Vol. 59. P. 77–90.

55. Chernukha A., Teslenko A., Kovaliov P., Bezuglov O. Mathematical Modeling of Fire-Proof Efficiency of Coatings Based on Silicate Composition. *Materials Science Forum*, 2020. Vol. 1006. P. 70–75.
56. Sadkovyi V., Pospelov B., Andronov V., Rybka E., Krainiukov O., Rud A., Karpets K., Bezuhla Yu. Construction of a method for detecting arbitrary hazard pollutants in the atmospheric air based on the structural function of the current pollutant concentrations. *Eastern-European Journal of Enterprise*, 2020. Vol. 6/10 (108). P. 14–22.
57. Kovaliova O., Pivovarov O., Kalyna V., Tchursinov Yu., Kunitsa E., Chernukha A., Polkovnychenko D., Grigorenko N., Kurska T., Yermakova O. Implementation of the plasmochemical activation of technological solutions in the process of ecologization of malt production. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020. Vol. 5/10 (107). P. 26–35.
58. Pospelov B., Andronov V., Rybka E., Krainiukov O., Maksymenko N., Meleshchenko R., Bezuhla Yu., Hrachova I., Nesterenko R., Shumilova A. Mathematical model of determining a risk to the human health along with the detection of hazardous states of urban atmosphere pollution based on measuring the current concentrations of pollutants. *Eastern-European Journal of Enterprise*, 2021. Vol. 4/10 (106). P. 37–44.
59. Sytnik N., Kunitsa E., Mazaeva V., Chernukha A., Kovalov P., Grigorenko N., Gornostal S., Yermakova O., Pavlunko M., Kravtsov M. Rational parameters of waxes obtaining from oil winterization waste. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020. Vol. 6/10 (108). P. 29-35.
60. European Commission Enterprise and Industry Directorate-General (2009) ‘Final Report of the High Level Group on the Competitiveness of the European chemicals industry’. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/chemicals/files/final_report/hlg_final_report_july09.pdf (дата звернення 27.08.2022).

61. Аналітичний огляд стану техногенної та природної безпеки в Україні за 2016 рік. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://cn.dsns.gov.ua>. (дата звернення 27.08.2022).
62. Malmén Y., Nissila M., Virolainen K. and Repola P. ‘Process chemicals – An ever present concern during plant shutdowns’, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2010. Vol. 23. P. 249–252.
63. Koteswara Reddy G, Kiran Y. Analysis of Accidents in Chemical Process Industries in the period 1998-2015, *International Journal of ChemTech Research*, 2016, Vol.9, №. 4 P. 177-191.
64. Duarte-Davidson R, Orford R, Wyke S, Griffiths M, Amlôt R, Chilcott R. Recent advances to address European Union Health Security from cross border chemical health threats. *Environ Int.* 2014. № 72. P. 3–14.
65. Азаренко Е.В., Гончаренко Ю.Ю., Дивизинюк М.М. Проблема управления экологической безопасностью прибрежных вод и пути ее решения. Системы обработки інформації. Харків: Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба. 2012. Вип. 2(100). С. 271–275.
66. Болотских М.В., Орешкин М.В., Шелихов П.В., Луганцев Е.П. Научные основы эффективного предупреждения и борьбы с чрезвычайными ситуациями и стихийными бедствиями. Луганск: ЛНАУ. 2004. 34 с.
67. Калач А.В., Савинова В.И., Калач Е.В. Интеллектуальная интегрированная система безопасности. Технологии техносферной безопасности. 2012. Вып. 5(45). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://academygps.ru/img/UNK/ asit/ttb/2012-1/05-05-12.ttb.pdf> (дата звернення 27.08.2022).
68. Крутков В.А., Полищук Ю.М. Геоинформационное обеспечение мониторинга окружающей среды и климата. Оптика атмосферы и океана. 2002. № 1. С. 12 – 20.
69. Teslenko A, Chernukha A, Bezuglov O, Bogatov O, Kunitsa E, Kalyna V, Katunin A, Kobzin V, Minka S. Construction of an algorithm for building regions of questionable decisions for devices containing gases in a linear

- multidimensional space of hazardous factors. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2019. Vol. 5(10–101). P. 42–49.
70. Chernukha, A., Chernukha, A., Ostapov, K., Kurska, T. Investigation of the Processes of Formation of a Fire Retardant Coating. *Materials Science Forum*, 2019. Vol. 1038, P. 480–485.
71. 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. 1/10 (97). P. 29–35.
72. 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.
73. Loosmore G., Cederwall R. Precipitation scavenging of atmospheric aerosols for emergency response applications: testing an updated model with new real-time data. *Atmospheric Environment*, 2004. Vol. 38. P. 993–1003.
74. Elperin T., Fominykh A., Krasovitev B., Vikhansky A. Effect of rain scavenging on altitudinal distribution of soluble gaseous pollutants in the atmosphere. *Atmospheric Environment*, 2011. Vol. 45(14). P. 2427–2433.
75. Wei L. Research on Countermeasures and Methods of Disposing Incidents of Hazardous Chemicals Reacting with Water. *Procedia Engineering*, 2011. Vol. 26. P. 2278-2286.
76. Pasquill F. Atmospheric dispersion of pollution. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 1971. № 414. P. 369–395.
77. Сердюцька Л.Ф., Попов О.О. До огляду моделей розповсюдження домішок в атмосфері міста. *Моделювання та інформаційні технології*. 2008. Вип. 45. С. 67–80.
78. Попов О.О. Стаціонарна та нестаціонарна математичні моделі розповсюдження забруднення в атмосфері. *Тези міжнародної наукової конференції «Інтелектуальні системи прийняття рішень та проблеми*

обчислювального інтелекту (ISDMCI'2008)» (м. Євпаторія, 19–23 травня 2008 р.). Херсон : ХНТУ, 2008. Т. 2, Ч. 2. С. 34–37.

79. Talhofer V., Hošková-Mayerová Š. Method of Selecting a Decontamination Site Deployment for Chemical Accident Consequences Elimination: Application of Multi-Criterial Analysis. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2019. V. 8(4). P. 171.
80. Tatarinov V. V., Prus U. V., Kirsanov A. A. Decision support software for chemical accident elimination management. *AIP Conference Proceedings*. 2019. V. 2195. P. 020076.
81. Martínez-García M., Zhang Y., Suzuki K., Zhang Y. D. Deep Recurrent Entropy Adaptive Model for System Reliability Monitoring. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2021. V. 17(2). P. 839-848.
82. Khan F., Rathnayaka S., Ahmed S. Methods and models in process safety and risk management: Past, present and future. *Process Safety and Environmental Protection*. 2015. V. 98. P. 116-147.
83. Pshinko O. M., Biliaiev M. M., Gunko O. Y. Localization of the air pollution zone in case of liquidation of an accident with chemically hazardous cargo. *Science and Transport Progress*. 2009. V. 27., P. 143–148.
84. Kustov M., Kalugin V., Hristich O., Hapon Y. Recovery method for emergency situations with hazardous substances emission into the atmosphere. *International Journal of Safety and Security Engineering*. 2021. V. 11(4). P. 419-426.
85. Майстренко С.Я., Беспалов В.П., Хурцилава К.В., Загреба Т.О. Прототипна версія системи «Повітря», Керівництво Користувача. DOI: 10.13140/RG.2.2.16982.50249.
86. Яцишин А.В. Комплексне оцінювання та управління екологічною безпекою при забрудненнях атмосферного повітря: дис. доктора технічних наук: 21.06.01 / Яцишин Андрій Васильович. Київ, 2013. 402 с.
87. Бабков В.С. Анализ математических моделей распространения примесей от точечных источников / В.С. Бабков, Т.Ю. Ткаченко // Научные труды

- ДонНТУ. Серія «Інформатика, кібернетика і вычислительная техника». — 2011. — Вып. 13(185). — С. 147—155.
88. Preferred / Recommended Models. Environmental Protection Agency [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.epa.gov> (дата звернення 27.08.2022).
89. Яцишин А.В. Моделювання якості атмосферного повітря та відповідні моделюючі системи / А.В. Яцишин // Моделювання та інформаційні технології. – 2012. – Вып. 63. – С. 10–18.
90. AERMOD: A dispersion model for industrial source applications Part I: General model formulation and boundary layer characterization. (accepted for publication) / A.J. Cimorelli, S. G. Perry, A. Venkatram [et al.] // Journal of Applied Meteorology. — 2005. — Vol. 44, iss. 5. — P. 682—693.
91. Desiato F. A long range dispersion model evaluation study with Chernobyl data / F. Desiato // Atmospheric Environment. — 1992. — Vol. 26 A. — P. 2805—2820.
92. ECOSIM Telematics Applications Project: ECOSIM Deliverable D05.02 [Електронний ресурс] / P. Mieth, S. Unger, N. Moussiopoulos [et al.] // Веб-сайт Environmental Software & Services GmbH AUSTRIA. – Режим доступу: <http://www.ess.co.at> (дата звернення 27.08.2022).
93. Bundy J., Pfarrer M. D., Short C. E., Coombs W. T. Crises and Crisis Management: Integration, Interpretation, and Research Development. Journal of Management, 2017. V. 43(6). P. 1661–1692.
94. Carol S. WISER and REMM: Resources for Disaster Response. Journal of Electronic Resources in Medical Libraries, 2009. V. 6. P. 253-259.
95. Polorecka M., Kubas J., Danihelka P., Petrlova K., Repkova Stofkova K., Buganova K. Use of Software on Modeling Hazardous Substance Release as a Support Tool for Crisis Management. Sustainability, 2021. V. 13. P. 438-453.
96. Dahia A., Merrouche D., Merouani D. R. Rezoug T., Aguedal H. Numerical Study of Long-Term Radioactivity Impact on Foodstuff for Accidental Release

- Using Atmospheric Dispersion Model. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2019. V. 44. P. 5233–5244.
97. Leelossy A., Molnar F., Izsak F., Havasi A., Lagzi I., Meszaros R. Dispersion modeling of air pollutants in the atmosphere: a review. *Central European Journal of Geosciences*, 2014. V. 6. P. 257-278.
 98. 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. V. 142. P. 107394.
 99. Elperin T., Fominykh A., Krasovitev B., Vikhansky A. Effect of rain scavenging on altitudinal distribution of soluble gaseous pollutants in the atmosphere. *Atmospheric Environment*, 2011. V. 45(14). P. 2427–2433.
 100. Gautam S., Liu T., Cole D. Sorption, Structure and Dynamics of CO₂ and Ethane in Silicalite at High Pressure: A Combined Monte Carlo and Molecular Dynamics Simulation Study. *Molecules*. 2019. V. 24(1). P. 99.
 101. Hua A. K., Lakey P. S., Shiraiwa M. Multiphase Kinetic Multilayer Model Interfaces for Simulating Surface and Bulk Chemistry for Environmental and Atmospheric Chemistry Teaching. *Journal of Chemical Education*. 2022. V. 99(3). P. 1246-1254.
 102. Shiraiwa M., Pfrang C., Koop T., Pöschl U. Kinetic multi-layer model of gas-particle interactions in aerosols and clouds (KM-GAP): linking condensation, evaporation and chemical reactions of organics, oxidants and water. *Atmos. Chem. Phys.*, 2012. V. 12. P. 2777–2794.
 103. Takaharu T., Tsuruta T., Nagayama G. Molecular Dynamics Studies on the Condensation Coefficient of Water. *J. Phys. Chem. B.*, 2004. V. 108(5). P. 1736-1743.
 104. A. Da̧browski. Adsorption from theory to practice. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2001. V. 93. P. 135-224.
 105. Compilation of Henry's Law Constants for Inorganic and Organic Species of Potential Importance in Environmental Chemistry. [Электронный ресурс]. –

Режим доступа: <http://www.henrys-law.org/henry-3.0.pdf> (дата звернення 27.08.2022).

106. Zeng Y., Fan C. Do D. D., Nicholson D. Condensation and Evaporation in Slit-Shaped Pores: Effects of Adsorbate Layer Structure and Temperature, *J Phys Chem C.*, 2014. V. 118. P. 3172-3180.
107. Sugata P. Tan and Mohammad Piri. Modeling the Solubility of Nitrogen Dioxide in Water Using Perturbed-Chain Statistical Associating Fluid Theory. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2013.V. 52 P. 16032–16043.
108. Winkler P.M., Vrtala A., Wagner P.E., Kulmala M. and other. Mass and Thermal Accommodation during Gas-Liquid Condensation of Water. *Phys. Rev. Lett.*, 2004. V. 93. P. 075701 – 075723.
109. Davidovits P., Kolb C.E., Williams L.R. and other. Mass Accommodation and Chemical Reactions at Gas–Liquid Interfaces. *Chem. Rev.*, 2006. V. 106. P. 1323 – 1354.
110. Kolb C. E., Cox R. A., Abbatt J.P., Ammann M. and other. An overview of current issues in the uptake of atmospheric trace gases by aerosols and clouds. *Atmos. Chem. Phys.*. 2010. V. 10 P. 10561-10605.
111. Gilde A., Siladke N., Lawrence C. P. Molecular Dynamics Simulations of Water Transport through Butanol Films. *J. Phys. Chem. A.*, 2009. V. 113(30). P. 8586-8590.
112. Bell K. J. Heat Exchanger Design for the Process Industries. ASME. *Journal Heat Transfer*. 2004. V. 126(6). P. 877–885.
113. Tang L., Cao F., Li Y., Bao J., Ren Z. High performance mid-temperature selective absorber based on titanium oxides cermet deposited by direct current reactive sputtering of a single titanium target. *Journal of Applied Physics*, 2016. V. 119. P. 045102.
114. Merentsov N. A., Golovanchikov A. B., Topilin M. V., Persidskiy A. V., Tezиков D. A. Mass transfer apparatus for a wide range of environmental processes. IOP Publishing. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019. V. 1399. P. 055028.

115. Freeman L., Ryan F., Kensler J., Dickinson R., Vining, G. A Tutorial on the Planning of Experiments. *Quality Engineering*, 2003. V. 25(4). P. 315-332.
116. Zhang R., Hoflinger F., Reindl L. Inertial Sensor Based Indoor Localization and Monitoring System for Emergency Responders. *IEEE Sensors Journal*, 2013. V. 13(2). P. 838-848.
117. Torres O., Bhartia P., Herman J. A long-term record of aerosol optical depth from TOMS observations and comparison to AERONET measurements. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2002. V. 59. P. 398-413.
118. Levy R., Remer L., Dubovik O. Global aerosol optical properties and application to MODIS aerosol retrieval over land. *Journal of Geophysical Research*, 2007. V. 112. P. 1321–1343.
119. The National Ambient Air Quality Standard (NAAQS). The U.S. Environmental Protection Agency (EPA), Dec. 14, 2012. 43 p.
120. Chu D. A., Kaufman Y. J., Zibordi G., Chern J. D., Mao J., Li C., Holben B. N. Global monitoring of air pollution over land from the Earth Observing System-Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). *J. Geophys. Res.*, 2003. V. 108. P. 4661.
121. Justice C. O., Giglio L., Korontzi S., Owens J., Morisette J. T., Roy D., Kaufman Y. The MODIS fire products. *Remote sensing of Environment*, 2002. V. 83(1-2). P. 244-262.
122. Herman J. R., Bhartia P. K., Torres O., Hsu C., Seftor C., Celarier E. Global distribution of UV-absorbing aerosols from Nimbus7/TOMS data. *J. Geophys. Res.*, 1997. V. 102. P. 16911–16922.
123. Ginoux P., Chin M., Tegen I., Prospero J., Holben B., Dubovik D., Lin S. J. Sources and distributions of dust aerosols simulated with the GOCART model. *J. Geophys. Res.*, 2001. V. 106. P. 20255–20273.
124. Cakmur R. V., Miller R. L., Tegen I. A comparison of seasonal and interannual variability of soil dust aerosols over the Atlantic Ocean as inferred by the TOMS AI and AVHRR retrievals. *J. Geophys. Res.*, 2011. V. 106. P. 18287–18303.

125. Stowe L. L., Ignatov A. M., Singh R. R. Development, validation, and potential enhancements to the second-generation operational aerosol product at the National Environmental Satellite, Data, and Information Service of the National Oceanic and Atmospheric Administration. *J. Geophys. Res.*, 1997. V. 102. P. 16923–16934.
126. Zadelhoff G.-J., Van A., Stoffelen P. Atmospheric Measurement Techniques Retrieving hurricane wind speeds using cross-polarization C-band measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2014. V. 7(2). P. 437-449.
127. Yueh S., Dinardo S., Fore A., Li F. Passive and active L-band microwave observations and modeling of ocean surface winds, *IEEE T. Geosci. Remote*, 2010. V. 48. P. 3087–3100.
128. Sweet W. V., Kopp R. E., Weaver C. P. Global and Regional Sea Level Rise Scenarios for the United States. NOAA Technical Report NOS. Maryland, 2017. P. 75.
129. WHO technical notes on drinking-water, sanitation and hygiene in emergencies, Technical note 9: how much water is needed in emergencies, 2011. World Health Organization / Water Engineering Development Centre.
130. Cunningham J. D., Ricker F. L., Nelson C. S. The National Polar-orbiting Operational Environmental Satellite System future US operational Earth observation system. *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2003. P. 34.
131. Diner D. J., Beckert J. C., Bothwell G. W., Rodriguez J. I. Performance of the MISR instrument during its first 20 months in Earth orbit. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens*, 2002. V. 40. P. 1449–1466.
132. Malkomes M., Toussiant M., Mamment T. The new radar data processing software for the German Weather Radar Network. *Proc. of ERAD, Copernicus GmbH*, 2002. P. 335–338.

133. Guichard F., Bourget E., Agnard J.-P. High-Resolution Remote Sensing of Intertidal Ecosystems: A Low-Cost Technique to Link Scale-Dependent Patterns and Processes. *Limnol. Oceanogr.*, 2000. V. 45. P. 328–338.
134. Hervoué A., Dunford R., Piegay H., Belletti B., Tremelo M.-L. Analysis of Post-Flood Recruitment Patterns in Braided-Channel Rivers at Multiple Scales Based on an Image Series Collected by Unmanned Aerial Vehicles, Ultra-Light Aerial Vehicles, and Satellites. *GISci. Remote Sens.*, 2011. V. 48. P. 50–73.
135. Wundram D., Löffler J. High-Resolution Spatial Analysis of Mountain Landscapes Using a Low-Altitude Remote Sensing Approach. *Int. J. Remote Sens.*, 2007. V. 29. P. 961–974.
136. Hochstein C., Arnesen S., Goshorn J., Szczur M. Selected Resources for Emergency and Disaster Preparedness and Response from the United States National Library of Medicine. *Medical Reference Services Quarterly*, 2008. V. 27 (1). P. 1–20.
137. Bader J. L., Nemhauser J., Chang F. Radiation Event Medical Management (REMM): Web Site Guidance for Health Care Providers. *Prehospital Emergency*, 2008. V. 12 (1). P. 1 – 11 . [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.informaworld.com/smpp/content~db=all?content=10.1080/10903120701710595> (дата звернення 27.08.2022).
138. Getzin S., Wiegand K., Schoening I. Assessing Biodiversity in Forests Using very High-Resolution Images and Unmanned Aerial Vehicles. *Methods Ecol. Evol.*, 2012. V. 3. P. 397–404.
139. Про затвердження Статуту дій у надзвичайних ситуаціях органів управління та підрозділів Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту та Статуту дій органів управління та підрозділів Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту під час гасіння пожеж. Наказ МВС України від 26.04.2018 № 340. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://search.ligazakon.ua/l_doc2.nsf/link1/RE32253Z.html (дата звернення 27.08.2022).

140. Про затвердження Рекомендацій щодо організації гасіння пожеж підрозділами МНС на промислових об'єктах підвищеної небезпеки з наявністю небезпечних хімічних речовин. Наказ МНС України від 22.09.2011 № 1017.
141. Про затвердження Методичних рекомендацій щодо режимів робіт о/с підрозділів ОРС ЦЗ у засобах індивідуального захисту у зонах хімічного та радіаційного забруднення. Наказ МНС від 07.08.2009 р. № 551.
142. Аветисян В.Г., Адаменко М.І., Александров В.Л., Кулаков С.В., Куліш Ю.О., Сенчихін Ю.М., Ткачук Р.С. Тригуб В.В. Рятувальні роботи під час ліквідації НС. Київ, Основа. 2006. 257 с.
143. WHO. Manual for the Public Health Management of Chemical Incidents. 2009. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.who.int/environmental_health_emergencies/publications/Manual_Chemical_Incidents/en/index.html (дата звернення 27.08.2022).
144. UK. A guide to the Control of Major Accident Hazards Regulations 1999 (as amended) (implementing Seveso II in Great Britain). 2006. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.hse.gov.uk/pubns/books/l1111.htm> (дата звернення 27.08.2022).
145. UNEP Flexible Framework for Addressing Chemical Accident Prevention and Preparedness – A guidance Document. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.unep.fr/scp/sp/saferprod/pdf/Flexible_Framework_brochure_FINAL_WEB.pdf (дата звернення 27.08.2022).
146. Manual for the Public Health Management of Chemical Incidents. The Inter-Organisation Programme for the Sound Management of Chemicals (IOMC). WHO Library Cataloguing-in-Publication Data, 2019. P. 101.

ДОДАТОК А

Список публікацій за темою дисертації

Наукові праці, у яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Статті у наукових фахових виданнях України, що входять до міжнародних наукометричних баз:

1. 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. (Включено до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Academic Research Index – ResearchBib, Ulrich's Periodicals Directory).

Здобувачу особисто належить аналіз статистики виникнення та протікання процесу ліквідації надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних хімічних речовин, обробка та аналіз результатів експериментальних досліджень.

2. Кустов М.В., Басманов О.Є., **Мельниченко А.С.** Моделювання зони хімічного ураження в умовах локалізації надзвичайної ситуації. Проблеми надзвичайних ситуацій. Харків, 2020. Вип. 32. С. 142–157. (Включено до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Academic Research Index – ResearchBib, Ulrich's Periodicals Directory).

Здобувачу особисто належить аналітичний огляд різних підходів до прогнозування зон хімічного забруднення, формалізація задачі моделювання процесів розповсюдження газів з атмосфери з їх паралельним осадженням, визначення припущень, які використовуються в процесі моделювання, розробка керуючого алгоритму методики прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів.

3. Кустов М. В., Басманов О. Є., Тарасенко О. А., **Мельниченко А. С.** Прогнозування масштабів хімічного ураження за умов осадження небезпечної речовини. Проблеми надзвичайних ситуацій. Харків, 2021. Вип. 33. С. 72–83. (Включено до міжнародних наукометричних баз Index

Copernicus, Academic Research Index – ResearchBib, Ulrich’s Periodicals Directory).

Здобувачу особисто належить розробка математична модель розповсюдження небезпечного газу в атмосфері при його активному осадженні водними аерозолями, описує процес осадження газу із атмосфері дрібнодисперсним рідинним потоком з різною інтенсивністю.

4. **Melnichenko A.**, Kustov M., Vasmanov 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. Volume 1 (10 (115)). P. 31–40. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.251675> (Включено до міжнародних наукометричних баз Scopus, DOAJ, EBSCOhost, BASE, CAS Source Index, ROAD, MIAR, CrossRef).

Здобувачу особисто належить розробка методики прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів, перевірка працездатності запропонованих математичних моделей динаміки небезпечних газів в атмосфері при їх активному осадженні.

5. Кустов М. В., **Мельниченко А. С.** Експериментальна перевірка моделі розповсюдження небезпечних газів при їх осадженні. Проблеми надзвичайних ситуацій. Харків, 2022. Вип. 35. С. 48– 62. (Включено до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Academic Research Index – ResearchBib, Ulrich’s Periodicals Directory).

Здобувачу особисто належить розробка лабораторної установки для проведення експериментальних досліджень динаміки розповсюдження небезпечних газів під впливом дисперсних потоків та імітації повітря, проведення експериментальних досліджень та перевірка достовірності та ефективності методики прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів.

**Статті у наукових періодичних виданнях інших держав з напрямку,
з якого підготовлено дисертацію:**

6. Kustov M.V., **Melnychenko A.S.**, Taraduda D.V., Korogodska A.M. Research of the chlorine sorption processes when its deposition by water aerosol. Scientific journal «Materials Science Forum» Switzerland: Trans Tech Publications Ltd, 2021. Volume 1038. P. 361-373. (Включено до міжнародних наукометричних баз Scopus, Index Copernicus, Open Academic Journals Index, Ulrich's Periodicals Directory, American Chemical Society, Bielefeld Academic Search Engine, CrossRef).

Здобувачу особисто належить теоретичне моделювання та інтерпретація експериментальних результатів щодо перевірки сорбційних процесів небезпечних газів дисперсними потоками в атмосфері.

7. Kustov M., **Melnychenko A.**, Vasmanov O., Tarasenko O. Modeling of gas sorption process by dispersed liquid flow. Scientific journal «Materials Science Forum» Switzerland: Trans Tech Publications Ltd, 2022. Volume 1068. P. 239-247. <https://doi.org/10.4028/p-jdydlo> (Включено до міжнародних наукометричних баз Scopus, Index Copernicus, Open Academic Journals Index, Ulrich's Periodicals Directory, American Chemical Society, Bielefeld Academic Search Engine, CrossRef).

Здобувачу особисто належить розробка методу розв'язання моделей прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій з використанням методу просторового розміщення вузлових точок, які задовольняють умові Куранта-Фрідрікса-Леві, порівняльний аналіз ефективності різних методик прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

8. **Мельниченко А.С.**, Кустов М.В. Моделювання зони хімічного ураження в умовах локалізації надзвичайної ситуації. The 11th International

scientific and practical conference “Eurasian scientific congress” Barca Academy Publishing, м. Барселона, 3 листопада 2020 р. С. 24–31. (Форма участі – заочна інтернет-конференція).

Здобувачу особисто належить формалізована постановка задачі та визначення можливих припущень для моделювання процесу розповсюдження хмари небезпечної хімічної речовини.

9. **Мельниченко А.С., Кустов М.В.** Розрахунок зони хімічного зараження при розливі НХР із залізничної цистерни. Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту: матер. Міжнародної науково-практичної конференції, м. Харків, НУЦЗУ, 27 лютого 2020 р. С. 87. (Форма участі – очна).

Здобувачу особисто належить перевірка працездатності розроблених математичних моделей на прикладі реальних аварій на хімічно небезпечних об'єктах.

10. **Мельниченко А.С., Кустов М.В.** Аналіз причин виникнення надзвичайних ситуацій на об'єктах зберігання хлору. Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту: матер. Міжнародної науково-практичної конференції, м. Харків, НУЦЗУ, 27 лютого 2020 р. С. 86. (Форма участі – очна).

Здобувачу особисто належить збір та аналіз статистичних даних щодо надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних хімічних речовин, визначення домінуючих причин виникнення таких надзвичайних ситуацій та характерних рис їх розвитку.

11. **Мельниченко А.С., Кустов М.В.** Розв'язання рівняння розповсюдження небезпечних хімічних речовин у просторі при його осадженні. Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту: матер. Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, м. Харків, НУЦЗУ, 16 квітня 2021 р. С. 408. (Форма участі – очна).

Здобувачу особисто належить розв'язання рівняння розповсюдження небезпечних хімічних речовин в атмосфері у присутності дисперсних струменів для його осадження.

12. **Мельниченко А.С.,** Кустов М.В. Вплив хімічної нейтралізації небезпечного газу на швидкість його осадження. Проблеми надзвичайних ситуацій: матер. Міжнародної науково-практичної конференції, м. Харків, НУЦЗУ, 20 травня 2021 р. С. 202. (Форма участі – очна).

Здобувачу особисто належить опис процесу хімічної нейтралізації слаботорозчинних у воді небезпечних газів, розрахунок оптимальної концентрації нейтралізуючих речовин у водному розчині.

13. **Мельниченко А.С.,** Кустов М.В. Основні причини виникнення аварійних ситуацій, що супроводжуються витоком хлору. Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту: матер. круглого столу «Суб'єкти забезпечення цивільного захисту (регіонального та місцевого рівня) в реалізації завдань із запобігання та ліквідації наслідків НС», м. Харків, НУЦЗУ, 26 лютого 2021 р. С. 81. (Форма участі – очна).

Здобувачу особисто належить збір та аналіз надзвичайних ситуацій на об'єктах зберігання хлору, визначення основних причин виникнення аварійних ситуацій та характерних властивостей надзвичайних ситуацій із викидом небезпечних речовин в атмосферу.

14. **Мельниченко А.С.,** Кустов М.В. Прогнозування розмірів зони хімічного ураження за допомогою пакету математичних програм MAPLE. Безпека людини у сучасних умовах: Зб. наук. праць XIII Міжнародної науково-методичної конференції, 147 Міжнародної наукової конференції Європейської Асоціації наук з безпеки (EAS), м. Харків, НТУ "ХПІ", 03 грудня 2021 р. С. 78. (Форма участі – заочна).

Здобувачу особисто належить розробка програмного алгоритму для розрахунку розподілу концентрації небезпечних газів в атмосфері за допомогою розробленої системи математичних рівнян.

15. **Мельниченко А.С.** Технологія локалізації та знезараження парогазової фази хмари НХР. Матер. круглого столу (вебінару) «Запобігання надзвичайним ситуаціям та їх ліквідація», м. Харків, НУЦЗУ, 23 лютого 2022 р. С. 177. (Форма участі – інтернет-конференція).

16. **Мельниченко А.С.,** Кустов М.В. Принцип роботи камери для дослідження процесів сорбції газів. Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності : Зб. наук. праць XVII Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених, курсантів та студентів, м. Львів, ЛДУ БЖД, 04 березня 2022 р. С. 96. (Форма участі – заочна).

Здобувачу особисто належить розробка конструкції експериментальної лабораторної камери для дослідження динаміки розповсюдження небезпечних газів у повітряному потоці із паралельним осадженням дисперсними струменями.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

17. Пат. №150432 України, МПК В01D 53/18 (2006.01) Камера для дослідження процесів сорбції газів / Кустов М.В., **Мельниченко А.С.**, Слепужніков Є.Д., Чиркіна М.А., Хмиров І.М.; Демент М.О., Рагімов С.Ю. патентовласник: Національний університет цивільного захисту України. – № u202105395 від 16.02.2022.

ДОДАТОК Б

**Лістинги програми розрахунку концентраційних полів
небезпечних газів**

```
restart; with(plots); with(plottools);
```

```
TTT := time();
```

Габариты расчетной решетки

```
Nx1 := -5; Nx2 := 50; Ny1 := -11; Ny2 := -Ny1; Nz1 := 0; Nz2 := 10;
```

```
FL := proc (a, b) if 0 <= a then Float(round(Float(SFloatMantissa(evalf(a)),
SFloatExponent(evalf(a))+b)), -b) else Float(round(Float(SFloatMantissa(evalf(a))+1,
SFloatExponent(evalf(a))+b)), -b) end if end proc;
```

```
N := 20; epsilon := 10^(-10); for i from 0 to trunc((N+1)*(1/2))-1 do r :=
evalf(cos(Pi*(4*i+3)/(4*N+2))); U := 1; while U > 0 do p2 := 0; p3 := 1; for j from 0 to N-1 do
p1 := p2; p2 := p3; p3 := ((2*j+1)*r*p2-j*p1)/(j+1) end do; dp3 := N*(p3*r-p2)/(r^2-1); r1 := r; r
:= r-p3/dp3; U := abs(r-r1)-100*epsilon*(1+abs(r)) end do; xx[i+1] := r; xx[N-i] := -r; w[i+1] :=
2/((-r^2+1)*dp3^2); w[N-i] := w[i+1] end do;
```

```
№q1 := proc (E, d, vx, vy, vz, tau, z0, x, y, z) (int((1/8)*E*exp(-(1/4)*((x-vx*(tau-t))^2+(y-
vy*(tau-t))^2)/(d*(tau-t)))*(exp(-(1/4)*(z-vz*(tau-t)-z0)^2/(d*(tau-t)))+exp(-(1/4)*(z-vz*(tau-
t)+z0)^2/(d*(tau-t))))/(tau-t)^(3/2)/(Pi^(3/2)*d^(3/2)), t = 0 .. tau) end proc;
```

```
proc(E, d, vx, vy, vz, tau, z0, x, y, z) ... end;
```

```
(1/8)*E*exp(-(1/4)*((x-vx*(tau-t))^2+(y-vy*(tau-t))^2)/(d*(tau-t)))*(exp(-(1/4)*(z-vz*(tau-t)-
z0)^2/(d*(tau-t)))+exp(-(1/4)*(z-vz*(tau-t)+z0)^2/(d*(tau-t))))/((tau-t)^(3/2)*Pi^(3/2)*d^(3/2));
```

```
qq1 := proc (E, d, vx, vy, vz, tau, z0, x, y, z) evalf(((1/8)*E*exp(-((1/4)*(x-vx*(tau-
t))^2+(1/4)*(y-vy*(tau-t))^2)/(d*(tau-t)))*(exp(-(1/4)*(z-vz*(tau-t)-z0)^2/(d*(tau-t)))+exp(-
(1/4)*(z-vz*(tau-t)+z0)^2/(d*(tau-t))))/((tau-t)^(3/2)*Pi^(3/2)*d^(3/2))) end proc;
```

```
proc(E, d, vx, vy, vz, tau, z0, x, y, z) ... end;
```

```
d := 5;
```

```
tau := 5;
```

```
vx := 5;
```

```
E := .1;
```

```
z0 := 0;
```

```
Q1 := qq1(E, d, vx, 0, 0, tau, z0, x, y, z);
```

```
qqq := evalf(subs(x = 0, y = 0, z = 2, Q1)); plot(qqq, t = 3/4*tau .. tau+2);
```

```
for n to N do tt[n] := xx[n]; for i from Nx1 to Nx2 do X[i] := i; for j from Ny1 to Ny2 do Y[j]
:= j; for k from Nz1 to Nz2 do Z[k]:=k; qq[n][i][j][k] := evalf(subs(x = X[i], y = Y[j], z = Z[k],
Q1)); qw[n][i][j][k] := evalf[7](w[n]*subs(t = (1/2)*tau*(1+xx[n]), qq[n][i][j][k])) end do end
do end do end do;
```

```
for i from Nx1 to Nx2 do print(i); for j from Ny1 to Ny2 do for k from Nz1 to Nz2 do Q[i][j][k]
:= (1000*((1/2)*tau))*add(qw[n][i][j][k], n = 1 .. N); print(qQ[i][j][k] = Q[i][j][k]) end do end
do end do:
```

```
for k from Nz1 to Nz2 do Mq[k] := max([seq(seq(Q[i][j][k], j = Ny1 .. Ny2), i = Nx1 .. Nx2)])
end do;# Пиковые значения концентрации
```

```
Nk := 8;
```

```
M := display(polygon([[Nx2+2, Ny1, 0], [Nx2+7, Ny1, 0], [Nx2+7, Ny1+(Ny2-Ny1)/(Nk+1), 0],
[Nx2+2, Ny1+(Ny2-Ny1)/(Nk+1), 0]]));
```

```
for k from Nz1 to Nz2 do Legend[k] := display([seq(translate(M, 0, i*(Ny2-Ny1)/(Nk+1),
Mq[k]*i/Nk), i = 0 .. Nk)], axes = frame, orientation = [-45, 60]); for i from 0 to Nk do MT[i][k]
:= display(textplot3d([Nx2+9, Ny1+i*(Ny2-Ny1)/(Nk+1)+1.5, Mq[k]*i/Nk, FL(Mq[k]*i/Nk, 1),
'font' = ["times", "roman", 14])) end do; TLeg[k] := display(seq(MT[i][k], i = 0 .. Nk)); PPQ[k]
:= display(TLeg[k], Legend[k], pointplot3d([seq(seq([X[i], Y[j], Q[i][j][k]], j = Ny1 .. Ny2), i =
Nx1 .. Nx2)], symbolsize = 10), scaling = constrained, font = [ROMAN, ROMAN, 14],
captionfont = [ROMAN, ROMAN, 14], labels = ["x, м", "y, м", typeset(q, " ", " ",  $\Gamma/m^3$ )], labelfont
= [TIMES, ROMAN, 14], axes = framed, orientation = [-90, 0], lightmodel = none, shading =
zhue, caption = typeset("H = ", k, 'm', " ", " ", "D = ", d, 'm^2/c', " ", " ", " Vx = ", vx, 'm/c', " ", " ", " t = ",
tau, 'c'), font = [TIMES, ROMAN, 14], captionfont = [NIMES, ROMAN, 14]) end do:
```

```
display(seq(PPQ[k], k = Nz1 .. Nz2), insequence = true);
```

```
for k from Nz1 to Nz2 do print(PPQ[k]) end do;
```

Шаг пространственный (м)(В данном варианте программы не предполагается его варьирования)

```
h := 1;
```

Шаг по времени (с) - условие Куранта-Фридрихса-Леви

```
Dt := h^2/(6*d);
```

Количество временных тактов (их должно быть много, т.к. величина самого интервала мала)

```
NT := 200;
```

Габариты водяной завесы (ее начало и конец по оси OX, по узлам решетки)

```
NxP1 := 10; NxP2:= 15;
```

Коэффициент осаждения

```
bet := .37;
```

Граничные условия на гранях внешнего параллелепипеда

```
for m to NT do for j from Ny1 to Ny2 do for k from Nz1 to Nz2 do QQ[Nx1][j][k][m] := 0;
QQ[Nx2][j][k][m] := 0;QQ0[Nx1][j][k][m] := 0; QQ0[Nx2][j][k][m] := 0 end do end do end do;
```

```
for m to NT do for i from Nx1 to Nx2 do for k from Nz1 to Nz2 do QQ[i][Ny1][k][m] := 0;
QQ[i][Ny2][k][m] := 0;QQ0[i][Ny1][k][m] := 0; QQ0[i][Ny2][k][m] := 0 end do end do end do;
```

```
for m to NT do for i from Nx1 to Nx2 do for j from Ny1 to Ny2 do QQ[i][j][Nz1][m] := 0;
QQ[i][j][Nz2][m] := 0;QQ0[i][j][Nz1][m] := 0; QQ0[i][j][Nz2][m] := 0 end do end do end do;
```

Задание начальных условий

```
for i from Nx1 to Nx2 do for j from Ny1 to Ny2 do for k from Nz1 to Nz2 do QQ[i][j][k][1] :=
Q[i][j][k]; QQ0[i][j][k][1] := Q[i][j][k]; print((i,j,k,m,rQ[i][j][k][1]=QQ[i][j][k][1] ,
rbeta[i][j][k][m]=beta[i][j][k][m])) end do end do end do ;
```

```
for m to NT do for i from Nx1 to Nx2 do for j from Ny1 to Ny2 do for k from Nz1 to Nz2 do
beta[i][j][k][m] := 0 od od od od;
```

```
for m to NT do for i from NxP1 to NxP2 do for j from Ny1 to Ny2 do for k from Nz1 to Nz2 do
beta[i][j][k][m]:=bet od od od od;
```

Задание функции источника и расчет

```
for m to NT do print(m); for i from Nx1+1 to Nx2-1 do for j from Ny1+1 to Ny2-1 do for k from
Nz1+1 to Nz2-1 do
```

```
if evalb(`and`(`and`(`and`(`and`(`and`(`and`(`i <= 1, i >= -1), j <= 1), j >= -1), k >= 0), k <= 1))=true
then QQ[i][j][k][m] := Q[i][j][k];QQ0[i][j][k][m] := Q[i][j][k] fi;
```

```
DQx0[i][j][k][m] := (QQ0[i+1][j][k][m]-QQ0[i-1][j][k][m])/(2*h);
```

```
DQxx0[i][j][k][m] := (QQ0[i+1][j][k][m]+QQ0[i-1][j][k][m]-2*QQ0[i][j][k][m])/h^2;
```

```
DQyy0[i][j][k][m] := (QQ0[i][j+1][k][m]+QQ0[i][j-1][k][m]-2*QQ0[i][j][k][m])/h^2;
```

```
DQzz0[i][j][k][m] := (QQ0[i][j][k+1][m]+QQ0[i][j][k-1][m]-2*QQ0[i][j][k][m])/h^2;
```

```
DQ0[i][j][k][m] := d*Dt*(DQxx0[i][j][k][m]+DQyy0[i][j][k][m]+DQzz0[i][j][k][m])/h^2-
vx*Dt*DQx0[i][j][k][m]/h;
```

```
QQ0[i][j][k][m+1]:=QQ0[i][j][k][m]+DQ0[i][j][k][m];
```

```
QQ0[i][j][0][m+1]:=QQ0[i][j][1][m+1];
```

```
DQx[i][j][k][m] := (QQ[i+1][j][k][m]-QQ[i-1][j][k][m])/(2*h);
```

```
DQxx[i][j][k][m] := (QQ[i+1][j][k][m]+QQ[i-1][j][k][m]-2*QQ[i][j][k][m])/h^2;
```

```
DQyy[i][j][k][m] := (QQ[i][j+1][k][m]+QQ[i][j-1][k][m]-2*QQ[i][j][k][m])/h^2;
```

```
DQzz[i][j][k][m] := (QQ[i][j][k+1][m]+QQ[i][j][k-1][m]-2*QQ[i][j][k][m])/h^2;
```

```
DQ[i][j][k][m] := d*Dt*(DQxx[i][j][k][m]+DQyy[i][j][k][m]+DQzz[i][j][k][m])/h^2-
vx*Dt*DQx[i][j][k][m]/h-beta[i][j][k][m]*QQ[i][j][k][m]*Dt;
```

```
QQ[i][j][k][m+1]:=QQ[i][j][k][m]+DQ[i][j][k][m];
```

```
QQ[i][j][0][m+1]:=QQ[i][j][1][m+1];
```

```
DQx0[i][j][k][m] := NULL;
```

```
DQxx0[i][j][k][m] := NULL;
```

```
DQyy0[i][j][k][m] := NULL;
```

```
DQzz0[i][j][k][m] := NULL;
```

```
DQ0[i][j][k][m-1] := NULL;
```

```
DQx[i][j][k][m] := NULL;
```

```
DQxx[i][j][k][m] := NULL;
```

```
DQyy[i][j][k][m] := NULL;
```

```
DQzz[i][j][k][m] := NULL;
```

```
DQ[i][j][k][m-1] := NULL;
```

```
print([
```

```
rQ[i][j][k][m]=QQ[i][j][k][m],
```

```
rDQx[i][j][k][m]=DQx[i][j][k][m],
```

```
rDQxx[i][j][k][m]=DQxx[i][j][k][m],
```

```
rDQyy[i][j][k][m]=DQyy[i][j][k][m],
```

```
rDQzz[i][j][k][m]=DQzz[i][j][k][m],
```

```
rDQ[i][j][k][m]=DQ[i][j][k][m],
```

```
rQ[i][j][k][m+1]=QQ[i][j][k][m+1]);
```

```
od od od od;
```

```
Высота над землей (м)
```

```
k := 2;
```

```
beta := 'beta':h := 'h':
```

Масштабный фактор, регулирует высоту рисунка, при этом по оси Z откладываются правильные значения

```
UU := 30; WW := 100;
```

for m from 1 to NT do

```
PPQQ0[k][m] := display(pointplot3d([seq(seq([X[i], Y[j], UU*QQ0[i][j][k][m]], j = Ny1 ..
Ny2), i = Nx1 .. Nx2)], symbolsize = 8,symbol=solidbox), scaling = constrained, font =
[ROMAN, ROMAN, 14], captionfont = [ROMAN, ROMAN, 14], labels = ["x, m", "y, m",
typeset(q, " ", " r/m^3)], labelfont = [TIMES, ROMAN, 14], axes = framed, orientation = [-90, 0],
lightmodel = none, shading = zhue, caption = typeset(h = k, 'm', " ", "D = ", d, 'm^2/c', " ", "
v[x]= vx, 'm/c', " ", "t[0]","=", tau, 'c', " ", " x[1] = NxP1, ' m', " ", " x[2] = NxP2, ' m', " ", " beta=
bet, ' 1/c', " ", "t=FL(m*Dt,2) , ' c' ), font = [TIMES, ROMAN, 14], captionfont = [NIMES,
ROMAN, 14], orientation = [-110, 70],tickmarks = [spacing(10), spacing(5),
[seq(4*i=FL(4*i/UU,2),i=1..10 )]]);
```

```
PPQQ[k][m] := display(pointplot3d([seq(seq([X[i], Y[j], UU*QQ[i][j][k][m]], j = Ny1 .. Ny2), i
= Nx1 .. Nx2)], symbolsize = 8,symbol=solidbox), scaling = constrained, font = [ROMAN,
ROMAN, 14], captionfont = [ROMAN, ROMAN, 14], labels = ["x, m", "y, m", typeset(q, " ", "
r/m^3)], labelfont = [TIMES, ROMAN, 14], axes = framed, orientation = [-90, 0], lightmodel =
none, shading = zhue, caption = typeset(h = k, 'm', " ", "D = ", d, 'm^2/c', " ", " v[x]= vx, 'm/c', "
", "t[0]","=", tau, 'c', " ", " x[1] = NxP1, ' m', " ", " x[2] = NxP2, ' m', " ", " beta= bet, ' 1/c', " ",
t=FL(m*Dt,2) , ' c' ), font = [TIMES, ROMAN, 14], captionfont = [NIMES, ROMAN, 14],
orientation = [-110, 70],tickmarks = [spacing(10), spacing(5), [seq(4*i=FL(4*i/UU,2),i=1..10
)]]);
```

```
PPPQQ[k][m] := display(pointplot3d([seq(seq([X[i], Y[j], WW*(QQ0[i][j][k][m]-
QQ[i][j][k][m])), j = Ny1 .. Ny2), i = Nx1 .. Nx2)], symbolsize = 8,symbol=solidbox), scaling =
constrained, font = [ROMAN, ROMAN, 14], captionfont = [ROMAN, ROMAN, 14], labels =
["x, m", "y, m", typeset("&Delta;q, " ", " r/m^3)], labelfont = [TIMES, ROMAN, 14], axes =
framed, orientation = [-90, 0], lightmodel = none, shading = zhue, caption = typeset(h = k, 'm', "
", "D = ", d, 'm^2/c', " ", " v[x]= vx, 'm/c', " ", "t[0]","=", tau, 'c', " ", " x[1] = NxP1, ' m', " ", " x[2] =
NxP2, ' m', " ", " beta= bet, ' 1/c', " ", "t=FL(m*Dt,2) , ' c' ), font = [TIMES, ROMAN, 14],
captionfont = [NIMES, ROMAN, 14], orientation = [-110, 70],tickmarks = [spacing(10),
spacing(5), [seq(4*i=FL(4*i/WW,2),i=1..10 )]]);
```

```
ProcQQ[k][m] := display(pointplot3d([seq(seq([X[i], Y[j], 100*(QQ0[i][j][k][m]-
QQ[i][j][k][m])/QQ0[i][j][k][m]], j = Ny1+1 .. Ny2-1), i = Nx1+1 .. Nx2-1)], symbolsize =
8,symbol=solidbox), scaling = constrained, font = [ROMAN, ROMAN, 14], captionfont =
[ROMAN, ROMAN, 14],labels = ["x, m", "y, m", typeset("&Delta;q, %")], labelfont = [TIMES,
ROMAN, 14], axes = framed, orientation = [-90, 0], lightmodel = none, shading = zhue, caption
= typeset(h = k, 'm', " ", "D = ", d, 'm^2/c', " ", " v[x]= vx, 'm/c', " ", "t[0]","=", tau, 'c', " ", " x[1] =
NxP1, ' m', " ", " x[2] = NxP2, ' m', " ", " beta= bet, ' 1/c', " ", "t=FL(m*Dt,2) , ' c' ),font =
[TIMES, ROMAN, 14], captionfont = [NIMES, ROMAN, 14], orientation = [-110, 70]);
```

end do;

Концентрация без локализации

```
display(seq(PPQQ0[k][2*m], m = 1 .. (1/2)*NT), insequence = true);
```

ДОДАТОК В

Акти впровадження результатів досліджень

ЗАТВЕРДЖУЮ

Начальник аварійно-рятувального загону
спеціального призначення

ГУ ДСНС України у Львівській області

Олег ІВАНЕЦЬ

«14» _____ 2022 р.



АКТ

Про впровадження матеріалів дисертаційної роботи
ад'юнкта Національного університету цивільного захисту України
Мельниченка Андрія Сергійовича

Комісія в складі:

- першого заступника начальника АРЗ СП ГУ ДСНС України у Львівській області підполковника служби ЦЗ Андрія РАТУШНОГО;

- начальника ХРЛ групи РХ та БЗ АРЧ АРЗ СП ГУ ДСНС України у Львівській області капітана служби ЦЗ Олександри ЧУШАК;

склала даний акт про те, що результати дисертаційних досліджень Андрія МЕЛЬНИЧЕНКА у вигляді:

- методика розрахунку зони надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів під час роботи аварійно-рятувальних підрозділів;

- програмний алгоритм прогнозування інтенсивності ліквідації надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів

були впроваджені в службову підготовку групи РХ та БЗ АРЧ АРЗ СП ГУ ДСНС України у Львівській області.

Акт не є підставою для отримання МЕЛЬНИЧЕНКО Андрієм Сергійовичем премій та інших винагороди з фондів Головного управління ДСНС України у Львівській області за використання результатів його дисертаційних досліджень.

Акт складений для подання у спеціалізовану вчену раду у зв'язку з захистом МЕЛЬНИЧЕНКО Андрієм Сергійовичем дисертації на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 263 – «Цивільна безпека».

Перший заступник начальника АРЗ СП
ГУ ДСНС України у Львівській області

 Андрій РАТУШНИЙ

Начальник ХРЛ групи РХ та БЗ АРЧ АРЗ СП
ГУ ДСНС України у Львівській області

 Олександра ЧУШАК

ЗАТВЕРДЖУЮ

ТВО начальника АРЗ СП

Головний ДСНС України у Харківській обл.



Валерій ФОМЕНКО

«22» _____ 08 _____ 20 22р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційного дослідження

на здобуття наукового ступеня доктора філософії

МЕЛЬНИЧЕНКА Андрія Сергійовича

Комісія в складі:

- заступник начальника Аварійно-рятувального загону спеціального призначення з питань реагування на НС Головного управління Державної служби України з надзвичайних ситуацій у Харківській області Андрій ТАРАНЕЦЬ;

- начальник групи радіаційного та хімічного захисту АРЧ Аварійно-рятувального загону спеціального призначення Головного управління Державної служби України з надзвичайних ситуацій у Харківській області Анастасія ОНАЦЬКА;

склала даний акт про те, що результати дисертаційних досліджень Андрія МЕЛЬНИЧЕНКА у вигляді:

- методики прогнозування інтенсивності ліквідації надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів;

- практичних рекомендацій керівникам ліквідації надзвичайних ситуацій на хімічно небезпечних об'єктах,

були впроваджені в практичну діяльність Головного управління ДСНС України у Харківській області при організації аварійно-рятувальних робіт на хімічно-небезпечному об'єкті та мінімізації наслідків таких надзвичайних ситуацій.

Акт не є підставою для отримання МЕЛЬНИЧЕНКОМ Андрієм Сергійовичем премій та інших винагороди з фондів Головного управління ДСНС України у Харківській області за використання результатів його дисертаційних досліджень.

Акт складений для подання у спеціалізовану вчену раду у зв'язку з захистом МЕЛЬНИЧЕНКОМ Андрієм Сергійовичем дисертації на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 263 – «Цивільна безпека».

Заступник начальника АРЗ СП

з питань реагування на НС

ГУ ДСНС України у Харківській області

«22» серпня 2022р.



Андрій ТАРАНЕЦЬ

Начальник групи

радіаційного та хімічного захисту АРЧ АРЗ СП

ГУ ДСНС України у Харківській області

«22» 08 2022р.



Анастасія ОНАЦЬКА

ЗАТВЕРДЖУЮ
 Проректор з навчальної та
 методичної роботи
 Національного університету
 цивільного захисту України
 доктор технічних наук, старший
 науковий співробітник
 Юрій КЛЮЧКА
 «12» 12 * код * 20 * 2 р.
 №08571360

АКТ

впровадження результатів дисертаційного дослідження
 на здобуття наукового ступеня доктора філософії
 МЕЛЬНИЧЕНКА Андрія Сергійовича

Комісія у складі:

Голови комісії: начальника кафедри організації та технічного забезпечення аварійно-рятувальних робіт Національного університету цивільного захисту України, кандидата технічних наук, доцента Віталія СОБИНИ;

Членів комісії:

– начальника кафедри спеціальної хімії та хімічної технології Національного університету цивільного захисту України, кандидата технічних наук Євгена СЛЕПУЖНИКОВА;

– викладача кафедри організації та технічного забезпечення аварійно-рятувальних робіт Національного університету цивільного захисту України, кандидата військових наук Ігоря НЕКЛОНСЬКОГО;

склала даний акт про те, що результати дисертаційних досліджень Андрія МЕЛЬНИЧЕНКА у вигляді:

– алгоритм прогнозування інтенсивності ліквідації надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів на хімічно небезпечних об'єктах;

– багатокритеріальну математичну модель прогнозування інтенсивності ліквідації надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів під впливом осадження дисперсними струменями та методику її розв'язання, були впроваджені в навчальний процес Національного університету цивільного захисту України при вивченні дисциплін «Ліквідація

наслідків надзвичайних ситуацій та гасіння пожеж» та «Захист населення та територій від наслідків зруйнувань радіаційних та хімічних об'єктів».

Це дозволило підвищити ефективність навчального процесу та якість викладення аспектів ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій, прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій на хімічно небезпечних об'єктах, а також організації аварійно-рятувальних дій служб та підрозділів ДСНС при реагуванні на техногенні надзвичайні ситуації.

Акт не є підставою для отримання МЕЛЬНИЧЕНКОМ Андрієм Сергійовичем премій та інших винагороди з фондів Національного університету цивільного захисту України за використання результатів його дисертаційних досліджень.

Акт складений для подання у спеціалізовану вчену раду у зв'язку з захистом МЕЛЬНИЧЕНКОМ Андрієм Сергійовичем дисертації на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 263 – «Цивільна безпека».

Голова комісії:

Начальник кафедри організації та технічного
забезпечення аварійно-рятувальних робіт
Національного університету
цивільного захисту України
« 10 » _____ 12 _____ 2022 р.



Віталій СОБИНА

Члени комісії:

Начальника кафедри спеціальної хімії
та хімічної технології
Національного університету
цивільного захисту України
« 10 » _____ 12 _____ 2022р.



Свген СЛЕПУЖНІКОВ

Викладач кафедри організації та технічного
забезпечення аварійно-рятувальних робіт
Національного університету
цивільного захисту України
« 10 » _____ 12 _____ 2022 р.



Ігор НЕКЛОНСЬКИЙ