

**ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ**

Мельниченко А.С., Кустов М. В., Демент М. О.

**ПРОГНОЗУВАННЯ ХІМІЧНОЇ ОБСТАНОВКИ
ПРИ АВАРІЯХ З ВИКИДОМ НЕБЕЗПЕЧНИХ
ГАЗІВ**

Монографія

Черкаси 2025

Рекомендовано до друку
вченою радою НУЦЗ України
(протокол від 24.04.2025 № 11)

Рецензенти:

КОРОГОДСЬКА Алла Миколаївна - завідувач кафедри загальної та неорганічної хімії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», доктор технічних наук, професор;

КЛЮЧКА Юрій Павлович - професор кафедри охорони праці та безпеки життєдіяльності Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова, доктор технічних наук, с.н.с.;

УДК 621.3

Прогнозування хімічної обстановки при аваріях з викидом небезпечних газів: монографія / А. С. Мельниченко, М. В. Кустов, М. О. Демент – Х.: «Діса плюс», 2025. – 170 с.

ISBN 978-617-8346-75-1

У монографії здійснено ґрунтовний аналіз нормативної бази України з питань ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій техногенного характеру, зокрема на хімічно небезпечних об'єктах. Розглянуто основні законодавчі та нормативно-правові акти, які регламентують діяльність органів державного управління, аварійно-рятувальних служб та інших спеціалізованих підрозділів у сфері реагування на надзвичайні ситуації, а також нормативні вимоги до проведення моніторингу хімічної обстановки та оперативного прогнозування наслідків аварій, що сприяє своєчасному ухваленню управлінських рішень. Крім того, проаналізовано міжнародний досвід і можливості імплементації передових світових практик у національну систему цивільного захисту.

Здійснено моделювання процесів розповсюдження газів з атмосфери з їх паралельним осадженням. Виконано теоретичне моделювання та експериментальну перевірку 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 за умови його активного осадження водними аерозолями та запропонована методика на її основі. Встановлено, що використання запропонованої методики прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів дозволяє підвищити точність прогнозування зони хімічного ураження як без осадження, так і з активним осадженням.

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 здійснення таких основних етапів ліквідації надзвичайної ситуації, як проведення розвідки, локалізація викиду небезпечної хімічної речовини, рятування людей, здійснення евакуації та дегазація особового складу та техніки.

Монографія орієнтована на наукових і практичних працівників органів та підрозділів служби цивільного захисту, викладачів, ад'юнктів і здобувачів вищої освіти.

УДК 621.3

ISBN 978–617–8346–75–1

© А. С. Мельниченко,
М. В. Кустов, М. О. Демент,
2025
© НУЦЗУ, 2025

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ	6
ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДИК ТА ПРИНЦИПІВ ПРОГНОЗУВАННЯ ТА ЛІКВІДАЦІЇ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ З ВИКИДОМ НЕБЕЗПЕЧНИХ ХІМІЧНИХ РЕЧОВИН	11
1.1. Аналіз нормативної бази України щодо ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних хімічних речовин	11
1.1.1. Класифікації надзвичайних ситуацій техногенного характеру з викидом небезпечних хімічних речовин	11
1.1.2. Правові основи організації ліквідації надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних хімічних речовин в Україні	15
1.2. Аналіз особливостей розвитку та ліквідації надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних хімічних речовин	22
1.2.1. Аналіз джерел небезпеки у разі виникнення надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних хімічних речовин	22
1.2.2. Особливості організації процесу ліквідації надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних хімічних речовин	31
1.3. Існуючі методики прогнозування наслідків викидів небезпечних хімічних речовин у разі виникнення надзвичайних ситуацій техногенного характеру	36
1.3.1. Математичні моделі прогнозування наслідків викидів небезпечних хімічних речовин у разі виникнення надзвичайних ситуацій....	37
1.3.2. Методики прогнозування хімічної обстановки у разі виникнення аварій з викидом небезпечних хімічних речовин в Україні	41
1.3.3. Методики прогнозування хімічної обстановки у разі виникнення аварій з викидом небезпечних хімічних речовин в країнах світу	46
Висновки за розділом 1	57

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДИКИ ПРОГНОЗУВАННЯ ХІМІЧНОЇ ОБСТАНОВКИ У РАЗІ ВИНИКНЕННЯ АВАРІЙ З ВИКИДОМ НЕБЕЗПЕЧНИХ ГАЗІВ 58

2.1. Математична модель прогнозування хімічної обстановки у разі виникнення аварій з викидом небезпечних газів 58

2.1.1. Формалізація задачі просторового розподілу концентрації газу за умови викиду з точкового джерела 58

2.1.2. Моделювання сорбційних процесів небезпечних газів дисперсними потоками 60

2.1.3. Розроблення математичної моделі прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів 74

2.1.4. Розроблення способу розв'язання математичної моделі прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів 81

2.2. Розроблення керуючого алгоритму методики прогнозування хімічної обстановки у разі виникнення аварій з викидом небезпечних газів....88

2.3. Розроблення програмної реалізації методики прогнозування хімічної обстановки у разі виникнення аварій з викидом небезпечних газів 91

Висновки за розділом 2 94

РОЗДІЛ 3. ПЕРЕВІРКА ДОСТОВІРНОСТІ МЕТОДИКИ ПРОГНОЗУВАННЯ ХІМІЧНОЇ ОБСТАНОВКИ У РАЗІ ВИНИКНЕННЯ АВАРІЙ З ВИКИДОМ НЕБЕЗПЕЧНИХ ГАЗІВ..... 96

3.1. Розроблення лабораторної установки та методики здійснення досліджень динаміки осадження небезпечних газів дисперсними потоками96

3.2. Експериментальна перевірка достовірності отриманих математичних моделей 101

3.2.1. Експериментальна перевірка достовірності математичних моделей сорбції небезпечних газів дисперсними рідинними потоками 101

3.2.2. Експериментальна перевірка достовірності математичної моделі прогнозування хімічної обстановки у разі виникнення аварій з викидом небезпечних газів 107

3.3. Оцінювання ефективності методики прогнозування хімічної обстановки у разі виникнення аварій з викидом небезпечних газів.....	112
Висновки за розділом 3.....	116
РОЗДІЛ 4. ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО ПРАКТИЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ МЕТОДИКИ ПРОГНОЗУВАННЯ ХІМІЧНОЇ ОБСТАНОВКИ У РАЗІ ВИНИКНЕННЯ АВАРІЙ З ВИКИДОМ НЕБЕЗПЕЧНИХ ГАЗІВ.....	118
4.1. Розроблення системи організації процесу ліквідації надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів	118
4.2. Рекомендації керівникам ліквідації надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів	130
Висновки за розділом 4	142
ВИСНОВКИ.....	143
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	147

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

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 – зона можливого хімічного зараження;

КНС – класифікатор надзвичайних ситуацій;

КМУ – Кабінет Міністрів України;

МРЛ – метеорологічний радіолокатор;

НС – надзвичайна ситуація;

НХР – небезпечні хімічні речовини;

НУЦЗУ – Національний університет цивільного захисту України;

ПЗХЗ – прогнозована зона хімічного зараження;

СВСП – ступінь вертикальної стійкості повітря;

ПАР – поверхнево-активна речовина;

ПВХ – полівінілхлорид;

ПНО – потенційно небезпечний об'єкт;

США – Сполучені Штати Америки.

ВСТУП

Сучасний стан промисловості вимагає використання великої кількості різноманітних хімічних речовин. Встановлено, що промислові підприємства здійснюють викиди великої кількості небезпечних хімічних речовин у навколишнє середовище навіть за нормальних умов роботи. Основними компонентами навколишнього середовища, на які впливають небезпечні речовини, є атмосфера, гідросфера, педосфера. Загальновідомо, що особливо інтенсивні викиди відбуваються у разі масштабних аварій на таких об'єктах. Незважаючи на значні зусилля щодо дотримання правил безпечної експлуатації на об'єктах та підприємствах, де виготовляють, зберігають та використовують 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 розташування в зоні ураження великої кількості цивільного населення та необхідність залучення значних сил та засобів для ліквідації 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 ухвалення управлінського рішення стосовно евакуації населення, важливим є здійснення коректного моніторингу та точного прогнозування розвитку надзвичайної ситуації [2]. Прогнозування розвитку надзвичайної ситуації є обов'язковим етапом для ухвалення коректного управлінського рішення щодо ліквідації аварії [3]. У контексті надзвичайних ситуацій, пов'язаних з викидом газоподібних небезпечних хімічних речовин, процес прогнозування набуває особливого значення.

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 належать напрямок та швидкість вітру, температура та

вологість повітря, атмосферний тиск. До параметрів викиду належать вид хімічної речовини, її температура, густина та тиск зберігання, інтенсивність викиду [5]. Існуючі методи та засоби запобігання надзвичайним ситуаціям, пов'язаним з викидом небезпечних речовин в атмосферу, здатні впливати на зону ураження на висоті декількох метрів [6]. Найбільш вагомими науковими результатами в цій галузі отримані в роботах вітчизняних та закордонних вчених: Басманова О. Є. [7], Попова О. О. [8], Івлева Л. С. [9], Кустова М. В. [10], Алояна А. Е. [11], Crowley J.N. [12], Rosenfeld D. [13], Shiraiwa M. [14] тощо.

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

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

Монографія присвячена вирішенню актуальної науково-практичної задачі в галузі цивільного захисту – розробленню методики 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.

В монографії викладено результати розв'язання комплексу задач фундаментального та прикладного характеру:

- удосконалено математичну модель забруднення атмосферного повітря в результаті аварійних викидів небезпечних хімічних речовин;
- розроблено та створено діючий зразок експериментальної установки для дослідження процесів сорбції газів;
- розроблено та програмно реалізовано методику прогнозування хімічної обстановки у разі виникнення аварій з викидом небезпечних газів.

Отримані результати висвітлено у наступних наукових працях: у роботі [15] здійснено аналіз статистики виникнення та перебігу 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 в атмосферному повітрі з їх паралельним осадженням, визначення припущень, які використовують в процесі моделювання, розроблення керуючого алгоритму методики прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів; в роботі [17] – розроблення математичної моделі розповсюдження небезпечного газу в атмосфері у разі його активного осадження водними аерозолями, описує процес осадження газу із атмосферного повітря дрібнодисперсним рідинним потоком з різною інтенсивністю; в роботі [18] – розроблення методики прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів, перевірка працездатності запропонованих математичних моделей динаміки небезпечних газів в атмосферному повітрі за умови їх активного осадження; в роботі [19] – розроблення лабораторної установки для здійснення експериментальних досліджень динаміки розповсюдження небезпечних газів під впливом дисперсних потоків та імітації повітря, здійснення 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] – розроблення методу розв'язання моделей прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій з викидом

небезпечних газів з використанням методу просторового розміщення вузлових точок, які задовольняють умову 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 слаботорозчинних 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] – розроблення програмного алгоритму для розрахунку розподілу концентрації небезпечних газів в атмосфері за допомогою розробленої системи математичних рівнянь; в роботі [29] – розроблення алгоритму локалізації аварії з викидом небезпечного газу; в роботі [30] – розроблення конструкції експериментальної лабораторної камери для дослідження динаміки розповсюдження небезпечних газів у повітряному потоці із паралельним осадженням дисперсними струменями; в роботі [31] – розроблення конструкції лабораторної установки та розрахунок типорозмірів форсунок розпилення.

Монографія може бути рекомендована для викладачів, ад'юнктів, аспірантів та здобувачів вищих навчальних закладів під час вивчення навчальних дисциплін за напрямками: «Цивільний захист», «Пожежна безпека», а також для науково-практичних працівників і фахівців зазначених напрямів.

РОЗДІЛ 1.

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

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. Встановлено, що промислові підприємства викидають велику кількість небезпечних хімічних речовин у навколишнє середовище навіть за нормальних умов роботи. Основними об'єктами навколишнього середовища, на які чинять негативний вплив небезпечні речовини, є повітря, вода та ґрунт. Особливо інтенсивні викиди відбуваються у разі виникнення на таких об'єктах масштабних аварій. Незважаючи на значні зусилля стосовно дотримання правил безпечної експлуатації на об'єктах та підприємствах, де виготовляють, зберігають та використовують 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].

Основна функція класифікації НС полягає у створенні ефективного механізму оцінювання подій, які відбулися або передбачені протягом

визначеного прогнозованого періоду часу. Цей механізм полегшує визначення необхідного реагування на відповідному рівні управління.

Класифікацію надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру визначають масштабами спричинених наслідків, а також технічними та матеріальними ресурсами, необхідними для їх ліквідації та забезпечення організації взаємодії центральних і місцевих органів виконавчої влади, підприємств, установ та організацій, пов'язаних з надзвичайними ситуаціями та ліквідацією їх наслідків [15].

Залежно від обсягів заподіяних наслідків, технічних і матеріальних ресурсів, необхідних для її ліквідації, надзвичайна ситуація може бути класифікована як національна, регіональна, місцева або об'єктова.

Для визначення рівня надзвичайної ситуації встановлюють наступні 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 зазнали негативного впливу внаслідок надзвичайної ситуації;
- 3) розмір заподіяних (очікуваних) збитків.

Найбільшим за масштабами класом є НС загальнодержавного рівня. До таких НС належать небезпечні події, які відбуваються на територіях двох та більше областей або їх наслідки можуть загрожувати територіям сусідніх держав. Також до НС загальнодержавного рівня належать 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. Якщо масштаби збитків перевищують певні порогові значення, навіть незначні аварії класифікують як НС загальнодержавного рівня.

Фактично, НС регіонального рівня обмежені кордонами певного регіону, водночас НС місцевого рівня виникають в межах одного населеного

пункту і потребують залучення сил і засобів для їхнього вирішення, які може забезпечити відповідна територіальна громада [16].

НС об'єктового рівня визначають як незначні аварії, зона впливу яких не поширена за межі одного об'єкта і не спричиняє значної шкоди.

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

Попереднє оцінювання події, що відбулася або може виникнути, та визначення її як надзвичайної ситуації здійснює оперативний черговий персонал об'єкта, місцевий орган виконавчої влади або орган місцевого самоврядування на підставі 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 поділяють 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, спричинені геологічними, метеорологічними, гідрологічними явищами. До таких аварій також належать природні пожежі, зміна стану повітряного басейну, інфікування людей, сільськогосподарських тварин, рослин хворобами чи шкідниками, зміна стану водних ресурсів.

НС соціально-політичного характеру, пов'язані із різними протиправними діями масового характеру, терористичними актами, що призводять до викиду небезпечних речовин, масовими заворушеннями та захопленням заручників.

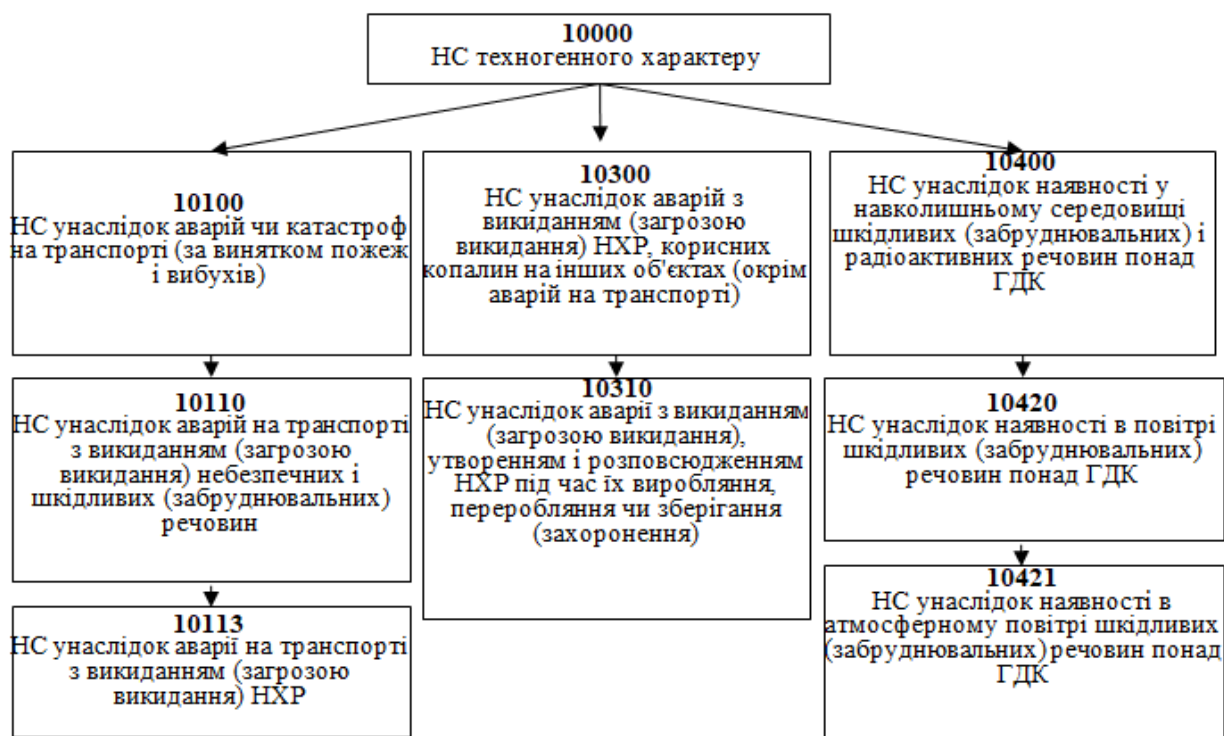
НС воєнного характеру, пов'язані з наслідками застосування зброї масового ураження або звичайних засобів ураження, під час яких виникають вторинні фактори ураження населення внаслідок зруйнування атомних і гідроелектричних станцій, складів і сховищ радіоактивних і токсичних речовин та відходів [32].

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, водночас 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 з існуючим законодавством Державним комітетом 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 вичерпної інформації про характер надзвичайної ситуації.

Класифікаційні критерії з відповідними кодами для можливих видів надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних хімічних речовин в атмосферу наведені 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

У контексті реагування на аварії на хімічно небезпечних об'єктах (ХНО) вкрай важливо дотримуватися циклу управління кризовими ситуаціями, що передбачає необхідні етапи моніторингу, прогнозування, ухвалення управлінських рішень та безпосереднього впливу на аварію [35]. За такої умови на правильність ухваленого управлінського рішення безпосередньо впливає точність прогнозування розвитку НС [36].

Прогнозування розвитку надзвичайної ситуації є обов'язковим етапом для ухвалення коректного управлінського рішення щодо ліквідації

аварії [37]. Особливо суттєвим є процес прогнозування за умови виникнення НС з викидом газоподібних небезпечних хімічних речовин. Однак процедура прогнозування залежить від характеру надзвичайної ситуації, що унеможлиблює використання загальних моделей.

Одним з основних принципів забезпечення цивільного захисту, згідно з Кодексом 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]. Як зазначалося раніше, підсистема моніторингу в Україні порівняно добре розвинена, на відміну від інших компонентів.

Як зазначалося раніше, підсистема моніторингу надзвичайних ситуацій в Україні перебуває на початковій стадії [24, 39], а отже, законодавча база для моніторингу НС ще не інтегрована в єдине правове поле [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 виконують постійний моніторинг і прогнозування надзвичайних ситуацій. Спостереження, лабораторний та інший контроль передбачає 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 створена та функціонує система моніторингу та прогнозування надзвичайних ситуацій. Кабмін визначає порядок функціонування системи моніторингу та прогнозування надзвичайних ситуацій, перелік установ та організацій, що належать до суб'єктів моніторингу, контролю, лабораторного моніторингу та прогнозування надзвичайних ситуацій [27]. Кабмін, відповідні місцеві державні адміністрації, органи місцевого

самоврядування, суб'єкти господарювання [41] визначають тематику 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 здійснення 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 належать 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], покладено 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 здійснення систематичних спостережень, збір, обробка, передача, збереження та аналіз інформації про стан навколишнього природного середовища, прогнозування його змін та розроблення науково обґрунтованих рекомендацій для ухвалення 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 здійснюють на трьох рівнях, які поділяють відповідно до регіональних особливостей – національного, регіонального та місцевого.

Виконання функцій ДСМД покладено на: Міністерство аграрної політики та продовольства України; Мінекології та природних ресурсів України; Державне агентство України з управління зоною обмеженого доступу; Державну службу геології та надр України; Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України; Українське державне космічне агентство; Державну службу України з надзвичайних ситуацій; Державну санітарно-епідеміологічну службу 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) здійснюють 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 здійснення моніторингу. Водночас відповідальні особи ПНО забезпечують виконання систематичних спостережень за критеріями стану ПНО та надають відповідним уповноваженим органам з питань надзвичайних ситуацій та ЦЗН інформацію про стан ПНО. Інформацію надають у формі електронного документа відповідно до закону або на паперовому носії в установленому порядку. Передачу інформації здійснюють за допомогою комп'ютерної системи зв'язку та наявних технічних засобів зв'язку з районом, областю чи містом, а також у формі письмових повідомлень. Інформацію конфіденційного характеру надають виключно захищені засоби зв'язку або у формі листів, оформлених у встановленому порядку. Внесення до відповідної бази даних підсистеми моніторингу ПНО та обробку інформації здійснюють спеціалісти 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 попереднє оцінювання 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 ухвалення управлінських рішень. У разі, якщо зміни стану ПНО можуть призвести до НС регіонального чи державного рівня, інформацію про неї невідкладно подають 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 сповіщення; застарілі матеріали та технічне обладнання; відсутність необхідного технічного оснащення в більшості регіонів України.

За умови комплексного підходу 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 територій Кодексу Цивільного захисту України не передбачає ефективних заходів щодо зменшення повітряного простору зони ураження, що є серйозним недоліком і суперечить загальним положенням (стаття 4 – Цивільний захист, стаття 7 – Основні принципи здійснення цивільного захисту) той самий закон [41].

Прогнозування та оцінювання хімічної обстановки передбачає визначення розмірів зони ураження та розташування її кордонів, прогнозування можливості ураження людей, які є в осередку ураження, визначення часу наближення зараженого повітря до об'єкта.

Зона атмосферного забруднення небезпечними газами у надзвичайних ситуаціях та умови забезпечення безпеки визначають 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 належить 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 органами місцевого самоврядування [47].

Аналіз законодавчої системи України у сфері ліквідації аварій на хімічно небезпечних об'єктах 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 оцінювання 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 належать 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, що 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 у разі виникнення надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних хімічних речовин

За оцінюванням, на хімічно небезпечних підприємствах щорічно відбувається понад 20 аварій [53]. Аналіз основних причин аварій, що відбулися на хімічно небезпечних об'єктах, показав, що найсуттєвішою причиною виникнення аварій є людський фактор, а саме помилка персоналу. Водночас, вагомою причиною виникнення надзвичайних ситуацій на хімічно небезпечних об'єктах є розгерметизація різноманітних ємностей для зберігання таких речовин [54]. Такі аварії призводять до великих розмірів зони уражень і, як наслідок, значних людських жертв [55]. Водночас в роботі [56] показано, що в індустріально розвинених країнах існує кілька сотень підприємств, що працюють з хімічними речовинами, що становлять високий рівень небезпеки. Незважаючи на постійний розвиток технологій, спрямованих на підвищення екологічної безпеки в таких промислових контекстах [57], потенціал викиду небезпечних хімічних речовин у разі аварії залишається серйозним приводом для занепокоєння. 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 використовують 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 зберігають або використовують у виробничій діяльності більше 285 тис. т небезпечних хімічних речовин, зокрема: 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 значні вражаючі фактори та більша швидкість розвитку зони зараження небезпечними хімічними речовинами (НХР), що вимагає здійснення швидкої евакуації 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 тощо. Отже, існує нагальна потреба в удосконаленні систем і методологій, що застосовують для запобігання та ліквідації аварій з хлором [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 належать до об'єктів підвищеної небезпеки.

За останні п'ять років в світі відбулося більше 100 аварій на хімічно небезпечних підприємствах [61]. Аналіз основних причин аварій, що відбулися на хімічно небезпечних об'єктах (ХНО), дозволив виокремити наступні взаємопов'язані групи НС, викликані: виходом з ладу (несправністю) обладнання (21 %); помилковими діями персоналу (38 %); зовнішніми впливами природного і техногенного характеру (4 %); розгерметизацією (ушкодженням) сховища (37 %) (Рис. 1.1.) [16].

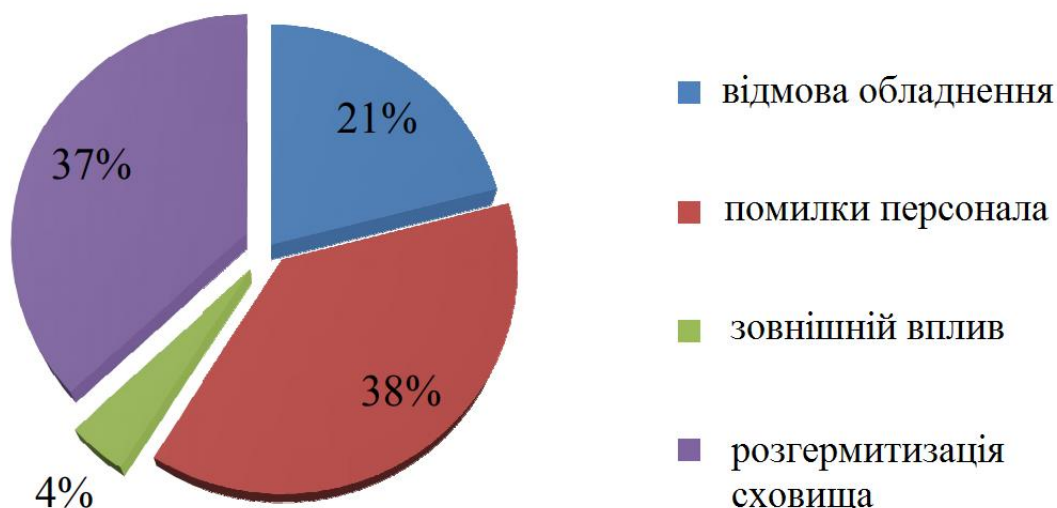


Рисунок 1.1. – Характер аварій на хімічно небезпечних підприємствах

Аналіз Рис. 1.1. показав, що найсуттєвішою причиною аварій є людський фактор, а саме помилка персоналу, яка, на жаль, залишається основним джерелом небезпечних ситуацій. Зазначена проблема має величезне значення, оскільки помилки можуть бути не тільки результатом недостатнього навчання або неуважності, а й наслідком стресових ситуацій, в яких опиняються працівники. Водночас, не менш вагомою причиною виникнення надзвичайних ситуацій на хімічно небезпечних об'єктах є розгерметизація різних ємностей для зберігання хімічно небезпечних речовин, що викликає масштабні проблеми, адже така ситуація може призвести до великих розмірів зони уражень і, як наслідок, до значних людських жертв.

За останнє століття відбулося понад 70 масштабних аварій з викидом хімічно небезпечних речовин. Результати аналізу таких аварій за роками наведені на рис. 1.2.

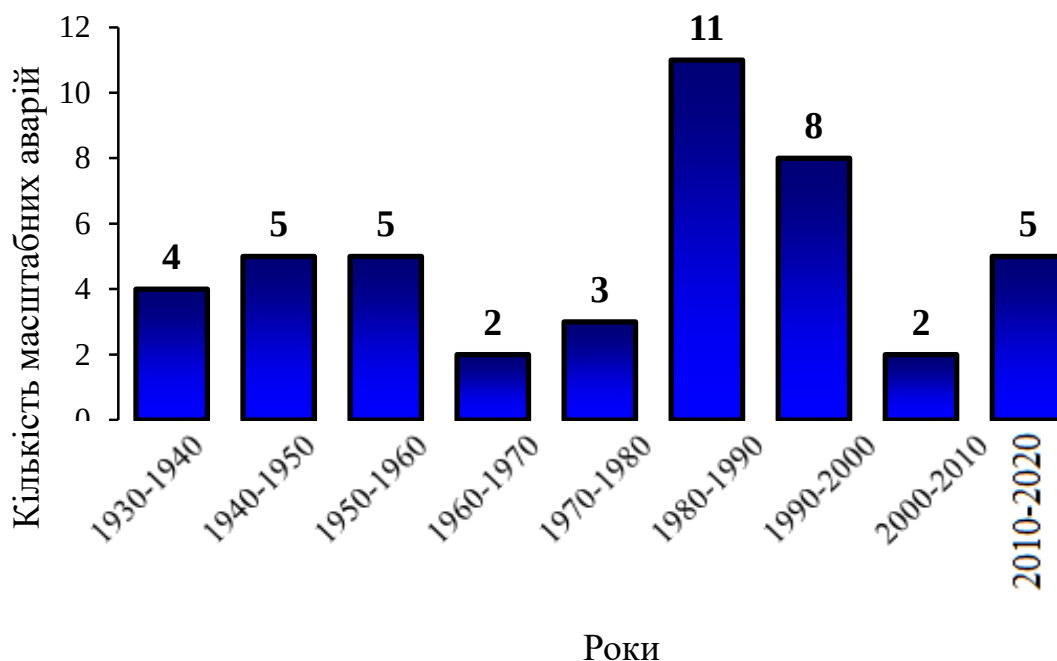


Рисунок 1.2. – Аварії, пов’язані з хімічними речовинами за 1930-2020 роки

Аналіз рис. 1.2. показав, що за останні сто років найбільша кількість аварій відбулася у 1980-1990 роках. Це період, коли хімічна промисловість у всьому світі стрімко зростала, що, без сумніву, призвело до збільшення ризиків. Однак розвиток нових, ефективних заходів безпеки не встигав за темпами індустріалізації. Як наслідок, значно зросла кількість смертей через аварії на хімічно небезпечних об’єктах, що підтверджується даними [63].

Однією з найтрагічніших аварій стала катастрофа в Бхопалі, де внаслідок витоку хімічних речовин загинуло близько 3000 осіб. Однак цей випадок став переломним моментом для перегляду стандартів безпеки на хімічно небезпечних об’єктах. Аналіз показав, що впровадження нових, ефективних заходів контролю та безпеки призвело до зниження кількості подібних катастроф. Наприклад, за останні 15 років кількість смертельних випадків від викиду небезпечних хімічних речовин склала менше 40 осіб, що є значним досягненням в галузі безпеки.

Один з відомих інцидентів стався у квітні 2004 року на хімічному заводі в Чунціні (Китай), коли викид хлору спричинив необхідність

термінової евакуації 200 000 осіб. Цей інцидент став нагадуванням про важливість оперативності в реагуванні на надзвичайні ситуації. Однак найбільшу шкоду спричинила аварія на хімічному комбінаті «Солана-Нератовіце» (Чехія), де внаслідок розгерметизації сховищ викинулося величезну кількість небезпечних хімічних речовин у повітря та водоймища, зокрема 80 тонн хлору та 30 тонн мазуту. Лише завдяки швидкому реагуванню рятувальників вдалося запобігти значно більшим жертвам, хоча 19 рятувальників загинули під час виконання робіт.

Ще один трагічний випадок стався в Мексиці у серпні 1991 року, коли під час залізничної катастрофи з рейок зійшли 32 цистерни з рідким хлором. Це призвело до потрапляння близько 300 тонн хлору в атмосферу, що спричинило значне забруднення повітря. Зона ураження була величезною, і в результаті вибуху та хімічного забруднення близько 500 осіб постраждали, з яких 17 загинули на місці. Цей інцидент змусив органи місцевої влади провести масову евакуацію понад тисячі жителів з найближчих населених пунктів, щоб мінімізувати подальші втрати серед населення. Такі катастрофи ще раз підкреслюють необхідність суворого контролю за безпекою перевезення небезпечних хімічних речовин та ефективної організації оперативного реагування на надзвичайні ситуації [64].

Нещодавній інцидент стався 3 вересня 2018 року в селі Радуже, що поблизу Кривого Рогу, коли під час переливання хлору з танку сталася аварія, і витік 25-30 кг хлору спричинив утворення хмари газоподібного хлору. Це призвело до того, що люди відчули ознаки отруєння – першіння в горлі та запаморочення [62]. Цей випадок став наочним підтвердженням недостатньої ефективності існуючих систем безпеки на ХНО.

Такий аналіз інцидентів на хімічно небезпечних об'єктах вказує на необхідність постійного вдосконалення систем безпеки та моніторингу, щоб мінімізувати наслідки аварій і забезпечити ефективне реагування на НС.

Аналіз аварій з викидом аміаку наведено 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	1986 рік	На м'ясокомбінаті відбувся витік аміаку з холодильної установки. Розгерметизація відбулася в компресорному приміщенні і хмара речовини через вентиляційні отвори швидко була розповсюджена в навколишнє середовище. Адміністрацію та персонал об'єкту було евакуйовано, але під час ліквідації надзвичайної ситуації загинув один пожежний.
Німеччина	1989 рік	Під час планового технічного обслуговування холодильного агрегату відбулася розгерметизація. Витік аміаку був виявлений на фланці після відкриття клапана зі сторони повітроохолоджувача. Оператори з технічного обслуговування не змогли самотійно усунути витік через відсутність достатньої видимості. Функціонування заводу було зупинено, а персонал терміново евакуйовано.
Уельс, Великобританія	1999 рік	За оцінюванням, з холодильного агрегату холодильної установки відбувся викид приблизно 400 кілограмів аміаку. Речовина потрапила до місцевої річки. В результаті надзвичайної ситуації загинуло понад 55 % річкової фауни. Цей інцидент висвітлив дві ключові проблеми. Перша, плани дренажу у той період не були розроблені відповідно до міжнародних стандартів. Друга, оператори заводу мали обмежену обізнаність про потенційні екологічні ризики.

Сполучені Штати Америки		
Альбукерке, США	1984 рік	У результаті вибуху в холодильній камері загинув пожежний, інший важко поранений. Встановлено, що причиною вибуху було накопичення небезпечної концентрації аміаку.
Клінтон, США	1985 рік	Відмова кутового шва компресора аміачної 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 витoku персонал було евакуйовано, але через короткий період часу відбувся вибух, який викликав великі ушкодження будівель.
Буневіль, США	2008 рік	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 було близько 40 тонн безводного аміаку. Пожежні ухвалили рішення не гасити вогонь, а дочекатися, коли ємність повністю вигорить. В результаті аварії ніхто не постраждав.

Україна		
м. Горлівка, Донецька обл.	2013 рік	На заводі ПАТ «Концерн Стирол», який розташовано в Донецької області, під час капітального ремонту заводу № 1 на міжцеховому аміачному колекторі відбулася розгерметизація трубопроводу рідкого аміак, і відбувся викид газу аміаку, а над заводом з'явилася 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 потребували медичної допомоги, 25 із них було госпіталізовано.
м. Суми	2017 рік	Витік аміаку відбувся у процесі заправки машини для його перевезення поблизу заводу «Центролит» на вулиці Курській. Назовні потрапило від 4 до 5 тонн хімічної речовини. Було задіяно п'ять одиниць техніки та 15 осіб особового складу, а також рятувальники ПАТ «Сумихімпром», бригада екстреної медичної допомоги. Рятувальники створили водяну завісу, яка локалізувала пари аміаку і запобігла їх розповсюдженню.
Хмельницька обл.	2018 рік	На території фермерського господарства поблизу міста вийшла з ладу арматура одного з резервуарів, що містив близько п'яти тонн аміаку. В результаті відбувся витік небезпечної хімічної речовини. На місце викликали рятувальників. Вони перекачали залишки аміаку в іншу цистерну, щоб запобігти подальшому витіканню.

Загалом у зону можливого хімічного забруднення повністю або частково потрапляє 308 адміністративно-територіальних одиниць, в яких мешкає понад 7 млн осіб, що становить приблизно 18 % від загальної кількості населення України.

Ця класифікація базується на аналізі виробничих потужностей, технологічних процесів та специфіки використання хімічно небезпечних речовин на підприємствах різних регіонів. Об'єкти з високим та підвищеним рівнем небезпеки, як правило, мають значну концентрацію виробничих потужностей і використовують великі об'єми хімічних реагентів, що вимагає особливої уваги до заходів безпеки. Крім того, такі об'єкти розташовані переважно в індустріально розвинених регіонах, де зростання хімічної промисловості супроводжується збільшенням ризику виникнення надзвичайних ситуацій.

На відміну від регіонів з нижчим рівнем небезпеки, в яких виробництво хімічних речовин має менш інтенсивний характер, у високоризикових зонах особливо важливо забезпечити своєчасний моніторинг, модернізацію технологічного обладнання та впровадження сучасних систем контролю. Це дозволить не лише знизити ризики аварій, але й мінімізувати потенційні наслідки у разі їх виникнення для навколишнього середовища та здоров'я населення.

Також важливо враховувати, що розміщення об'єктів з підвищеним хімічним ризиком часто співвідноситься з густонаселеними районами. В результаті потенційного витоку або аварії можливе забруднення значних територій, що загрожує життю та здоров'ю великої кількості людей. Це накладає додаткові зобов'язання на державні органи та підприємства щодо впровадження ефективних заходів з попередження та ліквідації НС.

Незважаючи на прогрес, досягнутий за останні роки в галузі хімічного виробництва, об'єкти, класифіковані як хімічно небезпечні, вважають найнебезпечнішими.

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 для ліквідації наслідків такої НС.

Необхідність створення системи ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій для атмосфери є невід’ємною частиною визначення терміну «цивільний захист». Згідно зі Статтею 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. Водночас система мінімізації наслідків НС повинна бути побудована 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 містить функціональну та територіальну підсистеми та їх ланки (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; виконання 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 із Законом України про охорону навколишнього природного середовища [41] пріоритет серед цих об'єктів має повітря. Такого ж висновку можна дійти, порівнюючи гранично допустимі концентрації у повітрі [46], воді [41] та ґрунті [42].

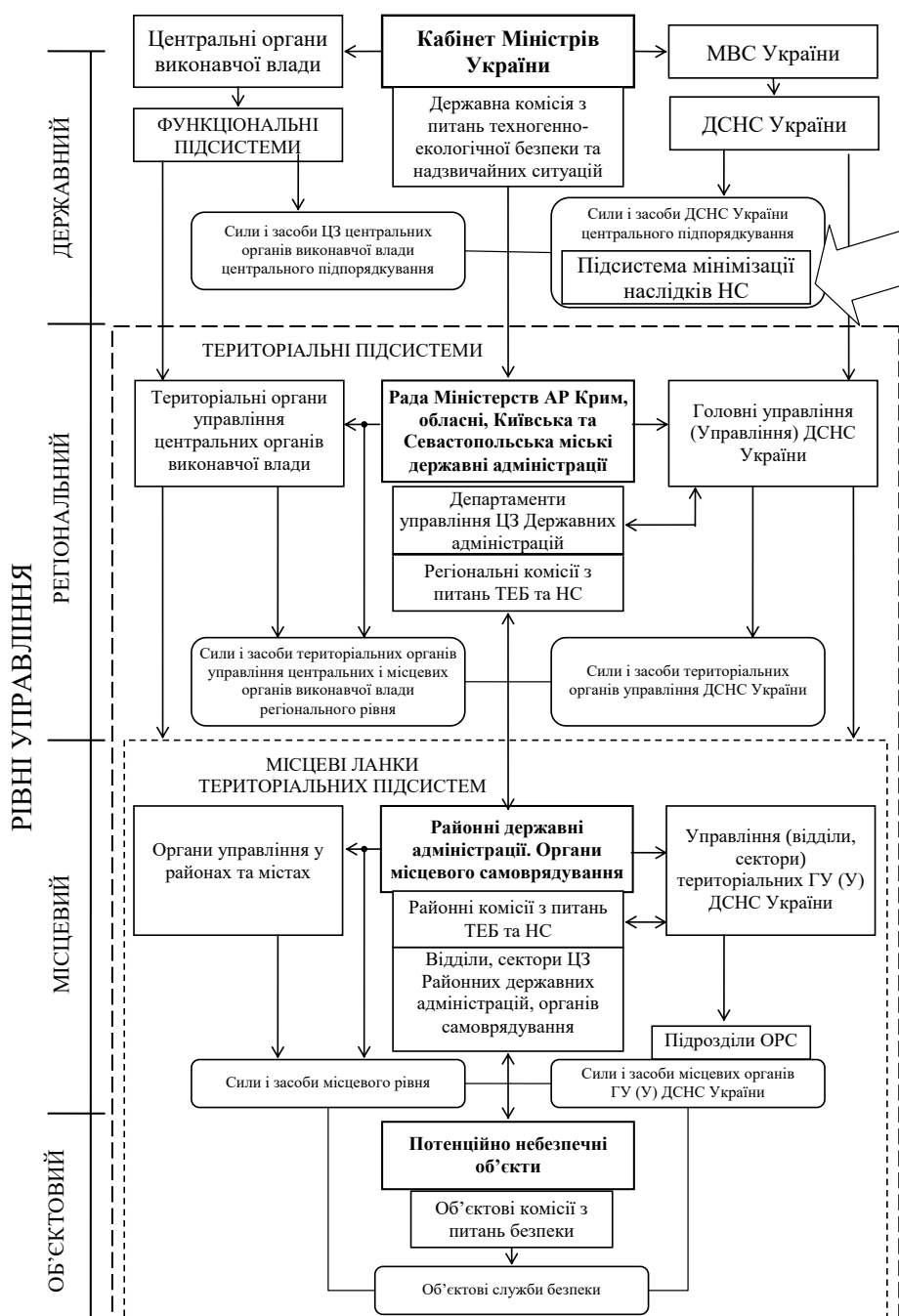


Рисунок 1.3. – Схема побудови та управління ЄДС ЦЗ з урахуванням підсистеми мінімізації наслідків НС для атмосферного повітря

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 надзвичайних ситуацій, першочерговим завданням є мінімізація наслідків надзвичайних ситуацій для атмосфери.

Наразі 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].

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

Як свідчить аналіз, 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. Ця концепція безпеки ефективна за нормальних умов експлуатації, оскільки впровадження системи запобігання забрудненню є менш складним і витратним, ніж система ліквідації забруднення, як з технічної, так і з економічної точки зору. Однак за умови виникнення 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 має у своєму складі чотири основних блоки: об'єкт впливу, система моніторингу, система підтримки та ухвалення рішення, система виконання рішення [65].

Структура моніторингу надзвичайних ситуацій має у своєму складі три рівні [67, 68]. До першого рівня належать пристрої реєстрації небезпечних факторів або метеорологічних параметрів. Такі прилади застосовують як для реєстрації одного параметра, так і декількох параметрів одночасно. Необхідно здійснювати контроль параметрів в різних просторових точках. З цією метою контрольні пристрої можуть бути сконфігуровані або в горизонтальному розташуванні, в точках, що характеризуються чіткими географічними координатами, або у вертикальній конфігурації, коли параметри регулюють на різній висоті.

Основну інформацію, отриману пристроями контролю параметрів з кабелів або радіоканалів, передають на пристрої другого рівня. Ці пристрої призначені для оброблення інформації та передавання її на третій рівень у зручному для використання вигляді. На третьому рівні здійснюють аналіз отриманої інформації та ухвалюють рішення щодо подальших дій 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.

Після ознайомлення особи, яка приймає рішення, з низкою варіантів управлінських рішень, вона обирає один з них або встановлює критерії.

Рішення, ухвалене відповідальною особою, надходить до системи реалізації рішень, де воно набуває формалізованого вигляду, в подальшому його доводять до відома відповідних виконавців, які впливають на процеси цивільного захисту та на забруднену територію. Зміни стану об'єкта впливу призводять до зміни значень параметрів, що вимірюють, їх фіксують засоби моніторингу. Після впровадження вищезазначених змін дані обробляють. Результатом цього процесу є подальше моделювання, ефективність якого свідчить про дієвість ухвалених управлінських рішень. Таким чином, цикл управління є замкнутим.

Ліквідація аварій на ХНО також повинна містити обов'язкові етапи циклу управління кризовими ситуаціями – моніторинг, прогнозування, ухвалення управлінських рішень 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]. Водночас на правильність ухваленого управлінського рішення безпосередньо впливає точність прогнозування розвитку надзвичайних ситуацій.

Найбільш ефективним методом зниження небезпек за таких НС є осадження газоповітряної хмари небезпечної хімічної речовини дрібно розпиленими водними струменями [71]. Дрібнодисперсні водні струмені застосовують рятувальні підрозділи на шляху розповсюдження небезпечної хмари газу. За рахунок широкого розповсюдження об'єктів очистки стічних вод, де використовують хлор, аварії з викидом газоподібного хлору набули широкого розповсюдження. Осадження хмари газоподібної НХР дозволяє суттєво зменшити розміри зони забруднення [72] та за певних умов взагалі припинити розповсюдження небезпечних газів [20]. Однак в роботі [73] визначають 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 враховувати у процесі моделювання осадження небезпечних газів при проведенні розрахунків.

З метою забезпечення безпеки праці оперативно-рятувальних підрозділів в зоні НС з викидом НХР та ухвалення управлінського рішення стосовно евакуації населення, важливим є здійснення 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 відбулася аварія тощо. Не варто ухвалювати управлінське рішення на основі найбезпечнішого варіанту прогнозування, оскільки це може призвести до значних і не виправданих втрат, спричинених під час евакуації.

Здійснено аналіз статистичних даних щодо виникнення та перебігу процесу реагування на надзвичайні ситуації в Україні та деяких інших країнах світу. Результати аналізу показали, що переважною причиною виникнення НС з викидом небезпечних речовин є людський фактор та вихід з ладу 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, оброблення 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 у разі виникнення надзвичайних ситуацій техногенного характеру

Для забезпечення достатньої точності розрахунку розмірів зон хімічного забруднення необхідно врахування значної кількості факторів, які умовно можна розподілити на два блоки – метеорологічні умови та параметри викиду. До метеорологічних умов належать напрямок та швидкість вітру, температура та вологість повітря, атмосферний тиск. До параметрів викиду належать вид хімічної речовини, її температура, густина та тиск зберігання, інтенсивність викиду. Під час здійснення оперативно-рятувальними підрозділами операцій з локалізації зони викиду ці фактори

доповнюють ще одним блоком, який містить інтенсивність подачі рідини для осадження, площу осадження та здатність рідини, що подають, поглинати або вступати в хімічну реакцію з небезпечною хімічною речовиною. Це значно ускладнює роботу штабу з ліквідації наслідків надзвичайної ситуації з прогнозування масштабів збитків, що може призвести до запізнілих і помилкових управлінських рішень.

1.3.1. Математичні моделі прогнозування наслідків викидів небезпечних хімічних речовин у разі виникнення надзвичайних ситуацій

Аналіз показав, що більшість математичних моделей опису розповсюдження небезпечних газів в атмосфері засновані на рівняннях Гауса. Ці моделі були надалі вдосконалені та розвинені багатьма вченими. Так, наприклад, гаусівську модель, що удосконалена Паскуїллом та Гіффордом використовує МАГАТЕ, як основну 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 визначають розподіл

концентрації газу, [с]; f – коефіцієнт, який визначає зміну з часом концентрації забруднення за рахунок взаємодії з навколишнім середовищем, [1/с].

Така модель дозволяє визначати рівень концентрації небезпечного газу лише для точкового джерела викиду, не враховує напрямку вітру, рельєф місцевості та не дозволяє визначати рівень концентрації за умов короткочасного та довготривалого викидів. Припускаємо, що швидкість вітру є постійною для всього досліджуваного об'єму.

Врахування більшої кількості факторів, та відповідно 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 $Oxyz$ за певних початкових та граничних умов 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/м³]; t – час, [с]; u, v, w – компоненти вітрового поля за напрямком осей x, y, z , відповідно, [м/с]; k_x, k_y, k_z – коефіцієнти турбулентної дифузії, [м²/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 за різних характеристик

середовища. Вони дають можливість використовувати параметри турбулентного обміну, які використовують 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 здійснювати прогнозування наслідків викиду небезпечних газів за стаціонарних та нестаціонарних умов 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 низку припущень. Нижче розглянемо найбільш розповсюджений підхід.

Стаціонарний розподіл концентрації нестійкого газу в необмеженому просторі $-\infty < x, y, z < \infty$, яка створена точковим джерелом газу, що розташовано в точці (x_0, y_0, z_0) , потужністю Q , описане 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 розташовано на висоті H над газонепроникною площиною $z = 0$, стаціонарний розподіл концентрації буде описаний виразом:

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

$$\text{де } |r - r_0| = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - H)^2}, \quad |r - r_1| = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z + H)^2}.$$

Такі моделі дозволяють визначати розподіл концентрації небезпечного газу лише за рахунок дифузії, тобто за відсутності конвективного перенесення. Однак це припущення зумовлене відсутністю впливу рельєфу місцевості, однорідністю атмосфери та неможливістю визначити рівні концентрації в умовах короткочасних, миттєвих та довготривалих викидів. Відповідно більшість переваг рівнянь турбулентної дифузії втрачено.

Широкого розповсюдження в теорії та практиці набули моделі, які розробив та розвинув Берлянд [8]. Такі 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:

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

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 ця модель не дозволяє враховувати процес осадження небезпечних газів дисперсними потоками за їх активного осадження рятувальними підрозділами.

1.3.2. Методики прогнозування хімічної обстановки у разі виникнення аварій з викидом небезпечних хімічних речовин в Україні

У разі виникнення масштабних викидів необхідне 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 використовують 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. Цього досягають за рахунок оброблення великого масиву моніторингової інформації за допомогою рекурентного аналізу [81]. Однак, точність прогнозування такого методу на пряму залежить від об'єму бази моніторингових даних. В умовах надзвичайних ситуацій зазвичай неможливо зібрати великий масив даних із достатньою точністю.

Найбільшу розповсюдженість набули експрес-методики, які враховують лише найсуттєвіші фактори з певним кроком зміни параметрів [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 поділити на два блоки – метеорологічні умови, параметри викиду та параметри осадження небезпечного газу. До метеорологічних умов належать напрямок та швидкість вітру, температура та вологість повітря, атмосферний тиск. До параметрів викиду належать вид хімічної речовини, її температура, густина та тиск зберігання, інтенсивність викиду. За умов роботи оперативно-рятувальних підрозділів з локалізації зони викиду до цих факторів додають ще один блок, який містить інтенсивність подачі рідини на осадження, площа осадження, здатність рідини, що подають, до поглинання чи хімічної реакції з небезпечною хімічною речовиною тощо [79]. Це все суттєво ускладнює роботу штабу з ліквідації надзвичайної ситуації з прогнозування масштабів ураження, що може призвести до ухвалення запізнілих та помилкових 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 така методика не дозволяє автоматично візуалізувати результати прогнозування.

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

Методику застосовують тільки для НХР, які зберігають у газоподібному або рідкому стані, і які в момент викиду, виливу переходять у газоподібний стан і створюють первинну або вторинну хмару НХР та передбачають здійснення розрахунків для планування заходів щодо захисту населення тільки на висотах до 10 м над поверхнею.

Її подають у вигляді таблиць, що унеможлиблює тривалі розрахунки і дає змогу оперативно здійснювати прогнозування масштабів забруднення.

Прогнозування і оцінювання хімічної обстановки під час аварій на ХНО і транспорті здійснюють для визначення:

1. Можливих наслідків аварій, порядку дій у зоні можливого забруднення і вжиття заходів для захисту людей – аварійне прогнозування.

2. Ступеня хімічної небезпеки об'єктів, де зберігають або використовують НХР, і адміністративно-територіальних одиниць, в межах яких живе населення, пов'язаних з ризиком його ураження НХР – довгострокове (оперативне) прогнозування.

Критерієм, за яким класифікують 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. Зону наносять 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 G , а бісектриса сектора співпадає з віссю хмари і орієнтована в напрямку вітру.

У процесі прогнозування післяаварійної обстановки визначають параметри прогнозованої зони хімічного зараження (ПЗХЗ) – розрахункової зони в межах зони можливого хімічного зараження (ЗМХЗ), параметри якої приблизно визначають за формою рівнобедреного трикутника (сектора) або за даними розвідки еліпса з кутовим розміром залежно від ступеня вертикальної стійкості повітря (СВПС).

Методика прогнозування і оцінювання ХО заснована на припущенні, що руйнування ємності, в якій зберігають НХР у рідкому або газоподібному

стані, призводить до утворення первинної і вторинної хмари. Наявність цих хмар слугує індикатором загальної глибини прогнозованої зони хімічного зараження (ПЗХЗ).

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

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

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 із затвердженою методикою розроблено та впроваджено програму «DSNS GIS».

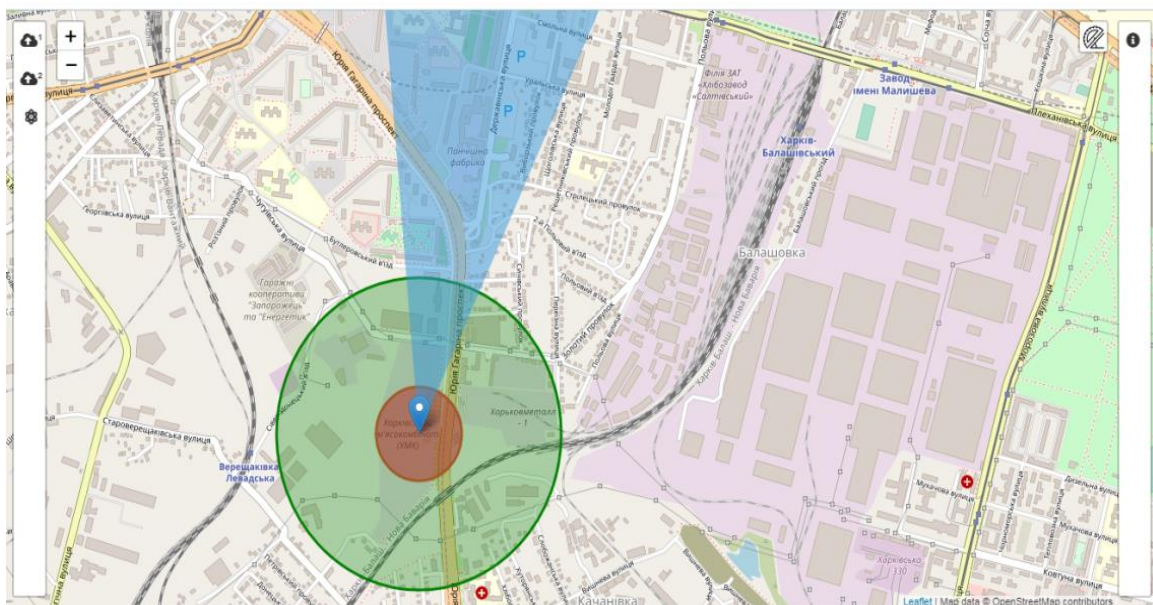


Рисунок 1.4. – Інтерфейс результатів прогнозування зони хімічного ураження за допомогою програми «DSNS GIS»

До переваг програми «DSNS GIS» належить можливість розрахунку первинної та вторинної хмари, простота введення даних та визначення осередку ураження, необхідність малої кількості вхідних даних для розрахунку та відповідність розрахунку 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 розробляють та використовують методики прогнозування розповсюдження домішок різноманітної природи в атмосфері на базі гаусівських математичних моделей та рівнянь турбулентної дифузії. Міністерством 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 виконання розрахунків забруднення від стаціонарних джерел промислових підприємств у приземних і верхніх шарах атмосфери із застосуванням стандартних методик. Наразі такі програми активно використовують промислові підприємства, 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 здійснювати 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 виконують безпосередньо після виникнення аварії, так і довгострокове для визначення можливих наслідків аварії.

На основі співпраці Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова НАН України та 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 комплексне оцінювання екологічного стану територій, що досліджують [86].

Такий програмний комплекс вирішує наступні задачі: 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 у разі виникнення аварій 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. Зважаючи на постійний розвиток систем атмосферного прогнозування, наразі застосовують цільовий підхід. Процес моделювання та побудови програмної системи здійснюють для конкретного

завдання з конкретними умовами. Це сприяє підвищенню точності результатів, отриманих для конкретної обмеженої задачі, без необхідності надмірного ускладнення процесу обчислень.

Найвідомішими реалізаціями моделей розповсюдження газів є програмні комплекси HGSYSTEM та низка програм, розроблених такими організаціями, 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 реалізують у вигляді певних програмних продуктів.

Найпоширенішими методиками, які рекомендовані EPA, та які вже використовують в США, Канаді, ЄС є такі системи як CTDMPLUS, 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, США; 3) інструментальний набір AERSURFACE для відтворення рельєфу місцевості; 4) AERMAP – програмні засоби слугують для встановлення зв'язку між моделлю та тривимірними даними, що стосуються місцевості та об'єктів. До того ж моделі цього класу обладнані інструментами, які полегшують врахування особливостей, пов'язаних з розсіюванням домішок на різних ділянках місцевості, зокрема, на дорогах, водоймах і в лісових масивах. Використання моделей цього класу пов'язане з істотними витратами і зусиллями під час підготовки вхідних даних і має сенс у процесі оцінювання екологічних ризиків від промислових джерел забруднення [90]. При EPA створено підрозділ AERMIC, відповідальний за впровадження в моделі EPA нових концепцій моделювання якості повітря, а також налаштування та введення 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, багатошарову, багатофункціональну 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 гази можуть потрапити до верхніх шарів атмосфери.

Каліфорнійським департаментом транспорту для визначення рівня забруднення, яке спричиняє автотранспорт розроблено програмний комплекс CALINE3. Модель заснована на багатофакторній стаціонарній гаусівській схемі розсіювання забруднюючих речовин з підвітряного боку від автомагістралей та міських вулиць на відносно простій ділянці місцевості.

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

Методика CTDMPLUS також базується на гаусовій моделі поширення викидів точкових джерел забруднення в умовах складного рельєфу. Здебільшого 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 є сукупністю 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 у разі складних метеорологічних умов та складної підстилаючої поверхні.

На базі основних кліматичних моделей розроблено програмний модуль AMETISTA для прогнозування якості повітря. Він містить 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 тощо, чимало яких доступні 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 використовують для моделювання процесів газової динаміки із врахуванням турбулентних процесів для газової та дисперсної фази.

Ці програмні пакети та методи можуть бути більш універсальними, але водночас вони призводять до значного зниження швидкості та точності розрахунків у порівнянні з цільовими підходами.

Значно менша кількість спеціалізованих програм орієнтована винятково на багатопроцесорні системи. Наприклад, програмний комплекс ECOSIM містить 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 дещо зміненої хіміко-кінетичної моделі. Хімічні реакції враховують найточніше шляхом розв'язку системи звичайних диференціальних рівнянь [92].

Окрему категорію методів складають програмні системи, які були ретельно розроблені для використання рятувальниками. Можливість автоматичного нанесення зони хімічного забруднення передбачена 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 ALOHA [95]. Ця програма здійснює моделювання розповсюдження небезпечної речовини з використанням 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 розповсюджено газ. Додаткові модифікації цих моделей дозволяють враховувати умови викиду небезпечного газу із технологічного апарату [98]. Це є актуально для умов аварії, коли викид може відбуватися з різною інтенсивністю або взагалі припинено у разі блокування аварійного апарату.

В США з цією метою використовують програмний комплекс ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres). Комплекс ALOHA призначений

для використання у процесі здійснення розрахунків під час розливу небезпечних хімічних речовин як допомога аварійно-рятувальним службам з 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 легкозаймисті 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 оцінювання ризику інгаляції, пов'язаної з токсичними хімічними речовинами в повітрі, та ступенем займистої хмари. Використання цих моделей повітряної дисперсії ґрунтується на здатності прогнозувати зміну концентрації забруднювача після його потрапляння в атмосферу як у часі, так і в положенні. ALOHA містить дві напівемпіричні моделі дисперсії повітря: гаусову модель використовують для прогнозування напрямку поширення хмари, що легше повітря; модель Heavy Gas використовують для забруднюючих хмар, що важчі за повітря (Рис. 1.4.).

Моделювання атмосферної дисперсії – це математичне моделювання поширення забруднювачів повітря в атмосфері. Його здійснюють за допомогою комп'ютерних програм і алгоритмів, що імітують дисперсію забруднювача. Дисперсійні моделі використовують для оцінювання концентрації забруднювачів повітря або токсинів, що потрапляють в атмосферу з різних джерел, зокрема промислових об'єктів, дорожнього руху та аварійних викидів хімічних речовин. Вони також можуть бути використані для прогнозування майбутніх концентрацій в конкретних сценаріях.

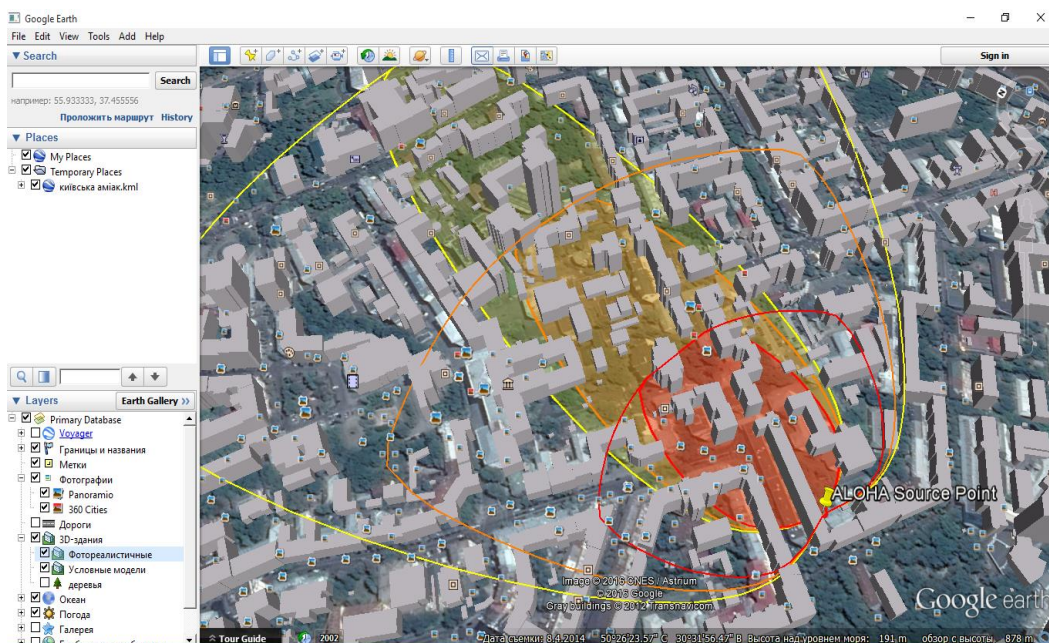


Рисунок 1.5. Результати прогнозування за допомогою програми ALOHA

Отже, дисперсійні моделі є переважачим типом моделей, що використовують у процесі формулювання політики у сфері якості повітря. Вони є найбільш корисними у процесі дослідження забруднюючих речовин, які розосереджені на великій відстані, і які можуть вступати в реакцію в атмосфері. Ці моделі також використовують 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, використовують для визначення того, чи промислові об'єкти діють згідно з національними стандартами навколишньої якості повітря (NAAQS) в Сполучених Штатах). Моделі також застосовують 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 здійснюють заходи щодо збереження чистоти

довкілля. Наразі 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 бути причиною пожежі або вибуху, які пов'язані з небезпечними матеріалами, такими як хімічні речовини або радіонукліди. Результати моделювання дисперсії можуть забезпечити оцінювання розташування зон впливу та концентрацій в навколишньому середовищі. Відповідні захисні заходи передбачають евакуацію або укриття на місці для осіб, які перебувають в підвітряному напрямку.

Природа дисперсійних моделей така, що вони залежать від методології, яку використовують у процесі їх розроблення. Однак важливо зазначити, що всі дисперсійні моделі вимагають використання 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;
- необхідно враховувати розташування, висоту і ширину будь-яких перешкод (будівель або інших споруд) на шляху газового факела, рельєф (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. Фундаментальною передумовою гаусових моделей є припущення, що розподіл частинок у потоці або хмарі є приблизно нормальним.

Візуалізована проекція зон хімічного забруднення безпосередньо нанесена на карту місцевості із зазначенням розподілу за рівнями небезпеки. Така карта дуже зручна для оперативної роботи штабу з ліквідації надзвичайної ситуації. На ній можна визначати будівлі, що підлягають евакуації, шляхи евакуації, збірні пункти тощо.

Однак всі перелічені вище підходи не враховують осадження хмари НХР оперативно-рятувальними підрозділами. Осадження небезпечних газів з атмосфери відбувається за рахунок процесу сорбції [99]. За цих обставин 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 за однакових умов. Для теоретичного опису процесу сорбції використовують, як безперервні моделі молекулярної динаміки [100], так і 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 бути здійснений опис сукупного процесу розповсюдження газу у просторі за умови його осадження 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, експериментальну перевірку достовірності розробленої моделі не здійснено.

Здійснено аналіз функціональних можливостей трьох методів прогнозування зони хімічного забруднення у разі виникнення надзвичайної ситуації: методики прогнозування наслідків розливу (викиду) небезпечних хімічних речовин у разі виникнення аварій на промислових об'єктах та транспорті; програмні продукти, розроблені в США – «ALONA», та НУЦЗУ «DSNS GIS». У результаті аналізу виявлені наступні переваги та недоліки:

1. Методики прогнозування наслідків розливу (викиду) небезпечних хімічних речовин у разі виникнення аварій на промислових об'єктах та транспорті:

Переваги:

- методики, підкріплені законодавчою базою;
- простота використання;
- швидкість розрахунку;
- мала кількість вихідних параметрів.

Недоліки:

- низька точність розрахунку;
- необхідність розрахунку вручну;
- вузький перелік умов, для яких можливе застосування;
- 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 за умови вибуху;
- широкий діапазон випадків аварії, для яких можливе 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 за трьома рівнями небезпеки, які відповідають міжнародним стандартам або розраховують вручну;
- інтегрування роботи із станціями гідрометеорологічного контролю.

Недоліки:

- необхідність великої кількості вихідних параметрів;
- не враховують ландшафт місцевості;
- не враховують можливість протікання хімічної реакції;
- не враховують кількість опадів над зоною ураження.

Таким чином, здійснено аналіз різних підходів до прогнозування зон хімічного забруднення, що застосовують в Україні та інших розвинених країнах світу. Аналіз показав, що кожен з підходів має свої переваги та недоліки. Зокрема, деякі методи забезпечують високу точність прогнозування за рахунок врахування великої кількості метеорологічних і географічних факторів, проте є складними в реалізації та потребують значних обчислювальних ресурсів. Інші методики є більш спрощеними та швидкими, однак можуть мати нижчу точність у складних погодних умовах або при складному рельєфі місцевості. Основною тенденцією розвитку систем прогнозування наслідків НС є автоматизація процесу розрахунку та інтеграція картографічних додатків до програмного комплексу прогнозування наслідків НС. Визначено, що наразі не існує методик прогнозування наслідків аварій з викидом небезпечних хімічних речовин, який здатен враховувати процеси осадження небезпечних газів з атмосфери дисперсними потоками.

Висновки за розділом 1

1. Встановлено, що надзвичайні ситуації з викидом небезпечних речовин в атмосферу за національним класифікатором належать до трьох підкласів НС техногенного характеру – НС, що виникає унаслідок аварій чи катастроф на транспорті; НС з викидом НХР та НС, що виникає 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 актах, що ґрунтуються на міжнародній правовій базі.

2. Здійснено аналіз статистики виникнення та протікання процесу ліквідації НС в Україні та інших країнах світу. Результати аналізу показали, що переважною причиною виникнення НС на хімічно небезпечних об'єктах є людський фактор та вихід з ладу 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. Здійснено аналіз різних підходів до прогнозування зон хімічного забруднення, що застосовують 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 наразі не існує методик прогнозування наслідків аварій з викидом небезпечних хімічних речовин, який здатен враховувати процеси осадження небезпечних газів з атмосфери дисперсними потоками.

РОЗДІЛ 2.

РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДИКИ ПРОГНОЗУВАННЯ ХІМІЧНОЇ ОБСТАНОВКИ У РАЗІ ВИНИКНЕННЯ АВАРІЙ З ВИКИДОМ НЕБЕЗПЕЧНИХ ГАЗІВ

2.1. Математична модель прогнозування хімічної обстановки у разі виникнення аварій з викидом небезпечних газів

Розробляти математичну модель будемо наступним чином: по-перше, розглянемо постановку задачі просторового розподілу концентрації газу за умови викиду 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. Потім, під час узагальнення отриманих результатів, розробимо математичну модель прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів та методи її розвитку.

2.1.1. Формалізація задачі просторового розподілу концентрації газу за умови викиду з точкового джерела

В роботі розглядають задачу точкового викиду газоподібної небезпечної хімічної речовини, що зберігають або транспортують в технологічному апараті під тиском. Хмара НХР поширюється за напрямком вітру. У процесі розповсюдження хмари може відбуватись її осадження дрібнодисперсним водяним потоком, який подають або стаціонарними приладами забезпечення безпеки на об'єкті або пересувними приладами оперативно-рятувальних підрозділів. Відповідно, кількість струменів для осадження, їх інтенсивність, площа покриття та розташування може бути довільна. У загальному вигляді схематично процес розповсюдження та осадження хмари НХР можна представити відповідно до рис. 2.1. [17].

За будь-яких параметрів струменів для осадження хмари небезпечної речовини процес розповсюдження хмари можна поділити 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. Порядок цих етапів може бути адаптований залежно від початкової ситуації.

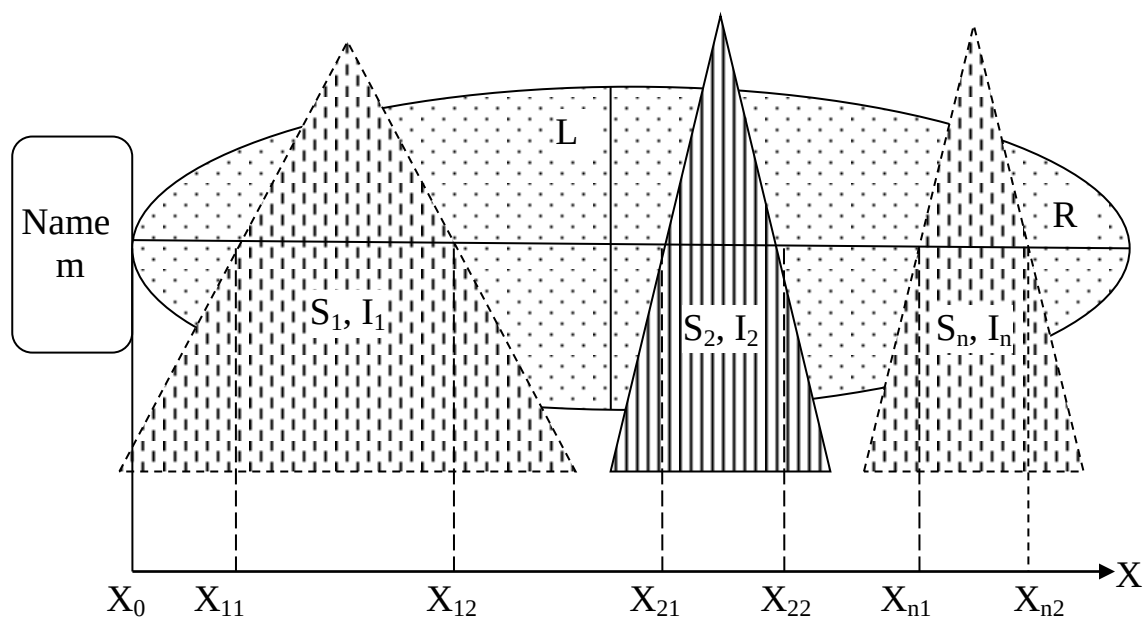


Рисунок 2.1. – Графічна інтерпретація задачі прогнозування розмірів (R, L) зони хімічного ураження за умови осадження НХР дрібнодисперсним потоком різної інтенсивності (I) та площі (S)

Для того, щоб полегшити розуміння процесів, пов'язаних з розповсюдженням і осадженням газоподібних речовин, ми зробимо наступні припущення:

1. Викид НХР відбувається з точкового отвору у разі 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. За такої умови коефіцієнт дифузії однаковий, як в горизонтальному, так і у вертикальному напрямках.

4. Коливання швидкості вітру у різних напрямках є незначними порівняно з масштабом викидів і точністю прогнозу, тому їх можна не враховувати.

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 всю 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 набули поширення імітаційні моделі.

Водночас існує два різних підходи до побудови моделей – кінетична

багатошарова 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] здійснено 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 наразі 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 аерозолі на кінетику поглинання, а також недостатньо уваги приділено визначенню коригувального коефіцієнта, що в кінцевому підсумку істотно знижує можливості застосування такої моделі. Тому розроблення 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 поділити на декілька окремих етапів. Схематично ці етапи показані на рис. 2.2.

Зміст етапів:

1. Перенесення молекул газу (G_A) на посадкову поверхню за рахунок дифузії в газовій фазі.
2. Адсорбція молекул газу (G_A) поверхнею краплі і рівновага в локальній області поверхні розподілу за рахунок адсорбції газів.
3. Перенесення адсорбованих молекул газу (G_A) в об'єм краплі за рахунок дифузії в рідині.
4. Хімічні реакції поглиненого газу (G_A) і води в об'ємі краплі з утворенням продуктів реакції (G_B).
5. Перенести продукти реакції (G_B) в об'єм краплі.
6. Збалансувати локальний об'єм поверхні крапель за рахунок адсорбції та десорбції продуктів хімічної реакції.
7. Перенесення частинок продукту (G_B) з поверхні краплі в газову фазу за рахунок дифузії.

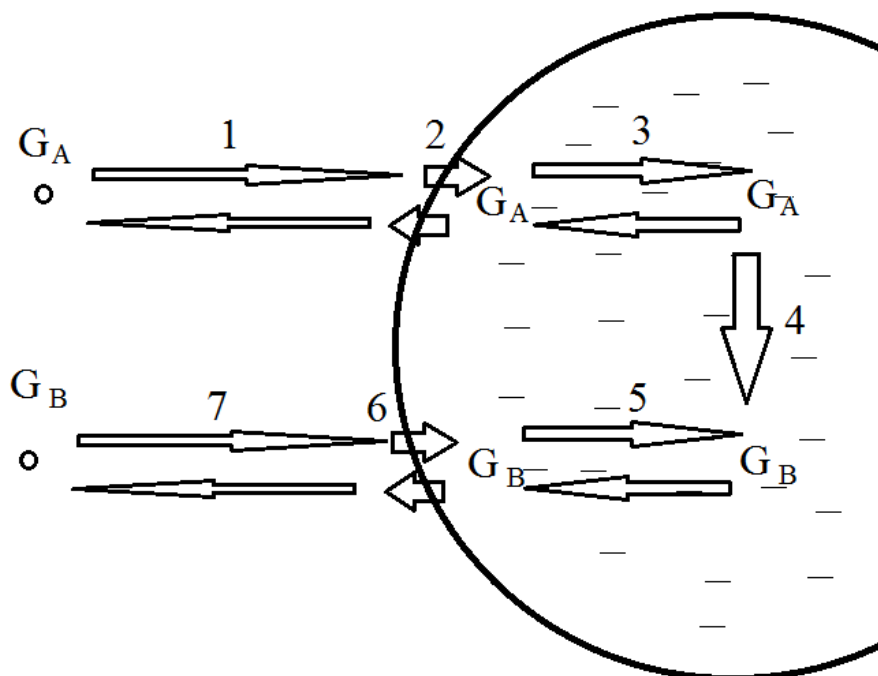


Рисунок 2.2. – Поетапна схема поглинання хімічно небезпечних газів рідинними дисперсними системами

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 його здебільшого визначають 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 у процесі 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_2S	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 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 визначають 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 виділяються за умови НС [19]

Газ	NO ₂	SO ₂	HCl	HCN
$C_g^0, \text{ моль} \cdot \text{м}^{-3}$	0,83	0,78	0,25	0,37
Газ	COCl ₂	H ₂ S	Cl ₂	NH ₃
$C_g^0, \text{ моль} \cdot \text{м}^{-3}$	0,033	0,24	0,65	2,35

Відповідно до кроків 1-7, математичний вираз для швидкості поглинання має наступний вигляд:

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

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. За можливості існування хімічної реакції між газом та рідиною в об'ємі краплі, коефіцієнт

K_{dif} замінюють 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.

Квантове зіткнення молекул газу з поверхнею краплі визначають коефіцієнтом дифузії конкретного газу в повітрі та ймовірністю зіткнення молекул газу з поверхнею краплі. Ці параметри легко визначають на основі положень молекулярно-кінетичної теорії, однак такий параметр, як розмір краплі аерозолу, 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'єднані в групи води, які можна розглядати як високодисперсні аерозолі з розміром частинок до 1000 Å. В атмосфері ці частинки відповідають Числу Кнудсена $K_n > 1$, 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. Смолуховський та А. Ейнштейн запропонували більш просту

модель частоти зіткнень двох молекул газів, у якій коефіцієнт частоти зіткнень (k_{col}) визначають 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 у повітрі; R_k , D_k – розмір та коефіцієнт дифузії водяного кластера відповідно. Для молекул зазвичай застосовують $R \approx \lambda$, 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), за яких визначають 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.

За розмірів крапель (R_{drop}) більше 1 мкм $Kn \rightarrow 0$. За таких розмірів 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 $R_g \ll R_{\text{drop}}$ та $D_g \gg D_{\text{drop}}$, відповідно вираз (2.4) набуде вигляду:

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

Це співвідношення справедливо для великих крапель диспергованого аерозолю.

В діапазоні розмірів крапель 0,1-1 мкм реалізовано 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:

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

Частоту зіткнень молекул газу із краплями аерозолю за певних умов визначають використовуючи розглянуті вище коефіцієнти k_{col} :

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

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

Концентрацію крапель води в одиниці об'єму атмосфери можна вважати постійною ($C_{\text{drop}} = \text{const}$) 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 $f(R_{\text{drop}})$ у рівняння (2.9).

Раніше ми розглядали закономірність частоти взаємодії молекул газу з поверхнею крапель атмосферного аерозолі. 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 визначена наступним чином:

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

Оскільки закон Генрі справедливий для процесу розчинення в атмосферних умовах, рівноважну швидкість утворення в поверхневому шарі краплі з (2.10) визначають 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 обирають 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 під час розгляду 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. До того ж такі розрахунки здійснюють без урахування фізико-хімічних властивостей поверхні краплі та закономірностей хімічної взаємодії газу з рідиною. Тому на цьому 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 здійснення 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 низку 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. Під час зіткнення 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 за швидкостей 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 ($f(E_g)$), на підставі 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 КМ GAP та MD.

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

Контактуючий газ	Значення α за моделлю (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 за моделлю (2.12) дещо відрізняються від літературних даних. У випадку пари H_2O , газів NH_3 , NO_2 відносна похибка сягає до 4 %; для CH_4 , SO_2 , HCl – від 7,4 % до 9,3 %. Тому для завдань масштабного моделювання атмосферних процесів і довгострокового прогнозування метеорологічної ситуації доцільніше використовувати розрахункові комплекси КМ GAP і MD. Водночас у процесі вирішення 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 є більш значними, доцільніше використовувати запропоновану модель (2.12).

Запропонована в роботі залежність для оцінювання впливу швидкості дифузії газу від об'єму 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, визначають як:

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

де $\bar{v}_g$ – середня швидкість руху молекул газу в повітрі, $\bar{v}_g = \sqrt{(8R_0 T)/(\pi M_g)}$; 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:

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

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 враховують коефіцієнт K_r (2,2), який визначають 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 визначають вмістом газу в поверхневому шарі та парціальним тиском газу продуктів реакції в атмосфері (P_g):

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

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 визначають їх вмістом у поверхневому шарі, який змінюється відповідно до швидкості їх утворення та дифузії до поверхні краплі:

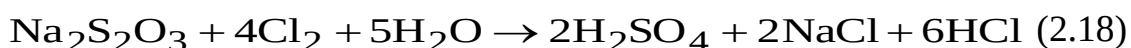
$$V_{des}^r = \frac{4\pi \cdot R_0 \cdot T \cdot C_g^r \cdot V_{abs} \cdot \alpha \cdot (K_r + K_{d.a}^r)}{P_g^r}, \quad (2.17)$$

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:



За рівнянням (2.18) можна визначити, що для нейтралізації 1 т хлору необхідно близько 0,5 т $Na_2S_2O_3$. Як видно з (2.18), реакція відбувається у водних розчинах. Однак тіосульфат натрію легкозаймистий і вибухонебезпечний.

Ефективним нейтралізатором хлору є гідроксид натрію:

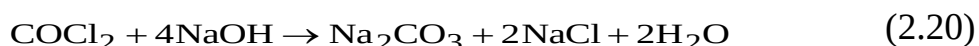


Для нейтралізації 1 т хлору необхідно 1,2 т $NaOH$. Гідроксид натрію добре розчинний у воді, тому в практиці дегазації зазвичай використовують водні розчини. Як видно з (2.19), за умови нейтралізації хлору лугом додатково утворюються солі, які розкладаються на гігроскопічні кристали і воду.

Не менш небезпечною речовиною є фосген ($COCl_2$), який потрапляє в атмосферу під час техногенних аварій (особливо за умови великих пожеж). У спеціальній літературі фосген називають «дихлорангідридом вугільної кислоти». Фосгену в природі не існує. Він поширений у хімічній промисловості, де його використовують як проміжний продукт у

виробництві, зокрема, фарб, пестицидів, фармацевтичних препаратів, полімерів, смол і затверджувачів. Річний видобуток становить близько 5 мільйонів тонн. Фосген утворюється у результаті термічного розкладання або фотоокислення хлорованих розчинників, а також у процесі горіння 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 рекомендують 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. Розроблення математичної моделі прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів

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

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

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 небезпеної хімічної речовини.

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].

За сталої величини 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 постадійних простих процесів (рис. 2.3) [24].

На першій стадії моделюють процес вільного розповсюдження газу в атмосфері після його витоку із технологічного апарату (2.21) – (2.23). Визначаючими факторами, за такої умови, 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.

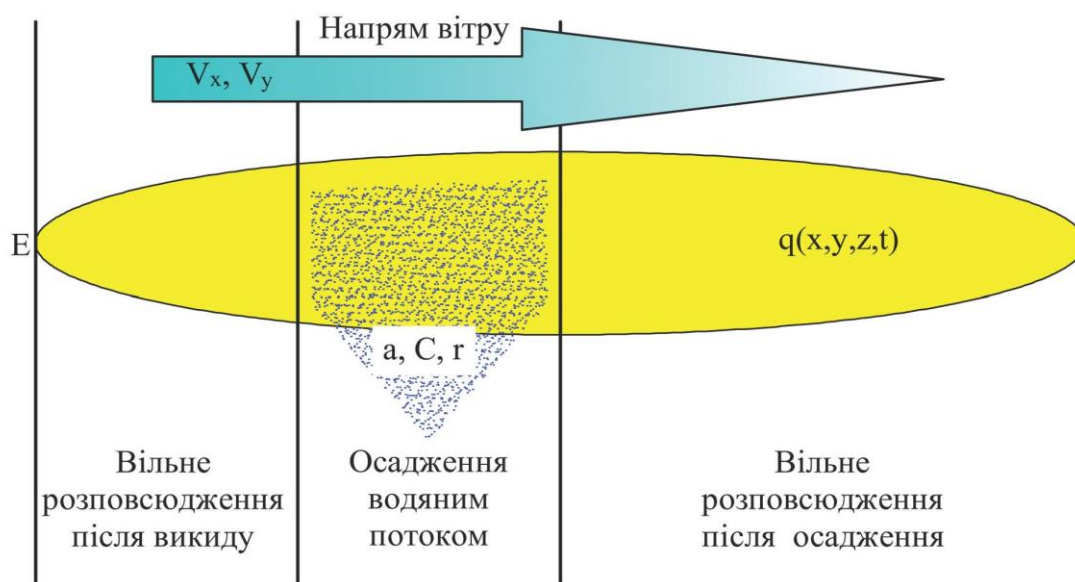


Рисунок 2.3. – Схема моделювання процесу розповсюдження небезпечного газу з активним осадженням

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 подають із стаціонарних або пересувних пристроїв. Припускають, що параметри водного аерозолі залишаються постійними за всією площею виловування. На інтенсивність вимивання небезпечного газу з атмосфери буде впливати коефіцієнт

акомодації 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 смузі $x_{n1} \leq x \leq x_{n2}$ 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 акомодації газу на поверхні рідини; C – об'ємна концентрація крапель води, m^{-3} ; r – середній радіус крапель води у струмені, м; H – постійна Генрі, моль/(Па $\cdot$ м³); R_0 – універсальна газова стала, Дж/(моль $\cdot$ 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

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

$$\text{де } A_1 = \frac{v_x}{2D}; \quad A_2 = \frac{v_y}{2D}; \quad A_3 = \frac{v_z}{2D}; \quad B = -\beta - \frac{1}{4D} (v_x^2 + v_y^2 + v_z^2).$$

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

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

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

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):

$$\begin{aligned} G(x, y, z, \xi, \eta, \zeta, \tau) = & \frac{1}{8(\pi D\tau)^{3/2}} \left\{ \exp\left[-\frac{(x-\xi)^2}{4D\tau}\right] - \exp\left[-\frac{(x+\xi)^2}{4D\tau}\right] \right\} \times \\ & \times \left\{ \exp\left[-\frac{(y-\eta)^2}{4D\tau}\right] \right\} \times \left\{ \exp\left[-\frac{(z-\zeta)^2}{4D\tau}\right] + \exp\left[-\frac{(z+\zeta)^2}{4D\tau}\right] + \right. \\ & \left. + 2A_3\sqrt{\pi D\tau} \exp[k^2 D\tau - A_3(z+\zeta)] \operatorname{erfc}\left(\frac{z+\zeta}{2\sqrt{D\tau}} - A_3\sqrt{D\tau}\right) \right\}. \quad (2.36) \end{aligned}$$

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

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

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

Перенесення початку координат в точку $(x_2, 0, 0)$ призводить до наступної граничної умови на межі зі смугою активного осадження

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

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]:

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

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

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

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

Отримана система з рівнянь (2.24), (2.30) та (2.39) дозволяє визначити межі зон забруднення небезпечними хімічними речовинами за їх активного осадження розпиленними струменями [29].

Наявність зони, в якій відбувається осадження НХР, призводить до появи у рівнянні дифузії доданка, який містить коефіцієнт осадження β . Оскільки область осадження займає не всю площину, то цей коефіцієнт не є сталим, а змінюється в залежності від координат. Внаслідок цього аналітичне розв'язання диференціального рівняння є ускладненим і доцільно використати чисельний

метод розв'язання, зокрема метод скінченних різниць.

2.1.4. Розроблення 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 за початкової умови

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

і крайової умови

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

отримаємо

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

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).

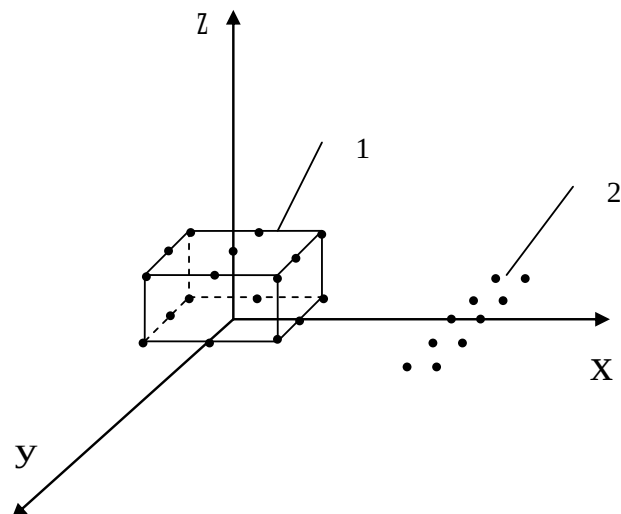


Рисунок 2.4. – Побудова регулярної сітки для області розповсюдження хімічної речовини: 1 – паралелепіпед із точок, сусідніх з точкою викиду; 2 – множина вузлів сітки, в яких відбувається осадження хімічної речовини

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 скінченних 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 скінченних 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) слідує, що приріст (за часом) концентрації у внутрішній точці (x_i, y_j, z_k) області описано 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 умову Куранта-Фрідрікса-Леві:

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

Розв'язання рівнянь відбувалося чисельними методами.

Для цього було використано математичний пакет MAPLE (Канада), версія 18. У процесі моделювання описана умова сорбції газу в атмосфері дрібнодисперсним потоком з дисперсністю 1 мм та інтенсивністю подачі рідини 2 л/с. Зона сорбції шириною 5 м розташована на відстані 10 м від осередку викиду газу. Процес сорбції моделюють за умови швидкості повітря 5 м/с (рис. 2.5.).

Як видно з рис. 2.5., моделюють умову безперервного викиду газу із точкового джерела з постійною інтенсивністю. Розрахунки показали, що за умови інтенсивності потоку більше 2 л/с та інтенсивності викиду газу 0,1 кг/с концентрація небезпечного газу практично знижена.

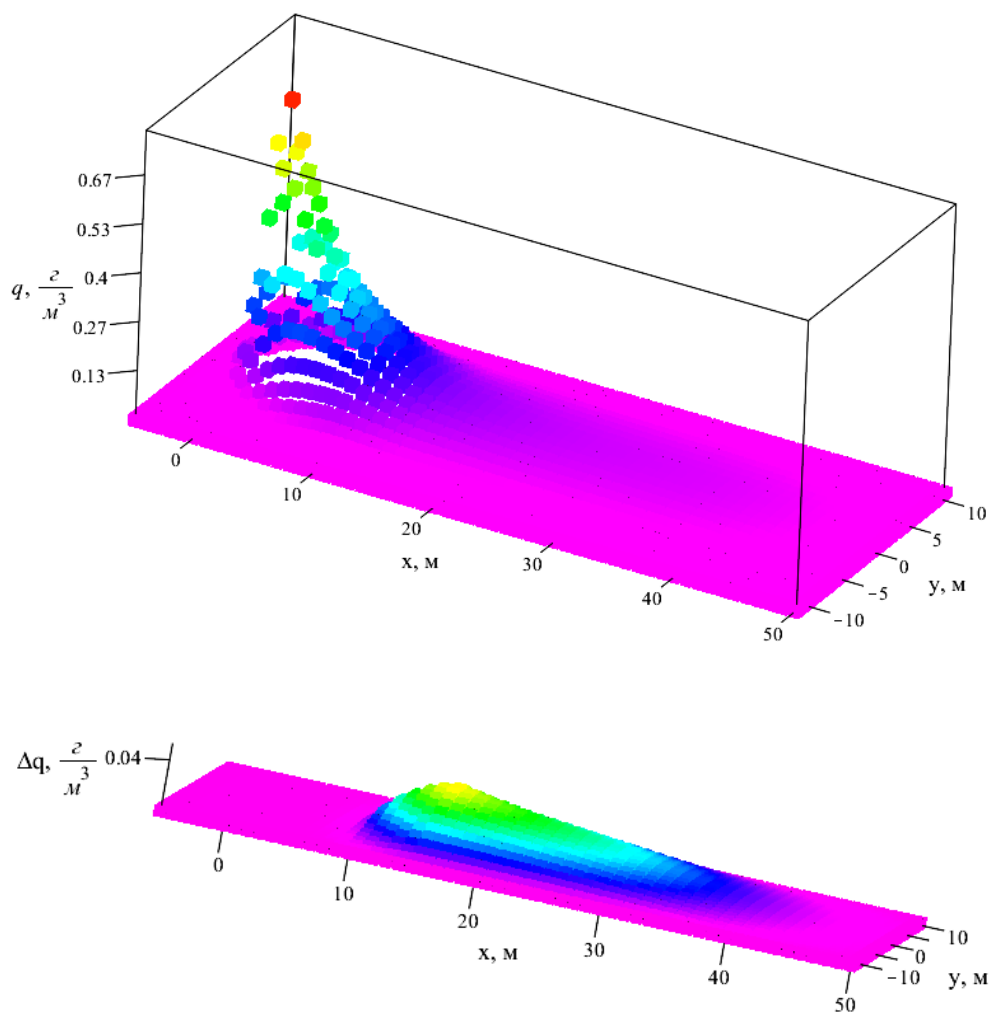


Рисунок 2.5. – Результати моделювання розповсюдження аміаку без осадження та у разі осадження дрібнодисперсними струменями (а) та просторовий розподіл різниці концентрацій газу у повітрі без осадження та з осадженням (б)

Для оцінювання ефективності процесу сорбції здійснено 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 %. За такої умови, через 10 секунд після початку подачі дрібнодисперсного потоку прохід газу крізь водяну стіну припинено, а той газ, що вже пройшов розсіюється до безпечних концентрацій.

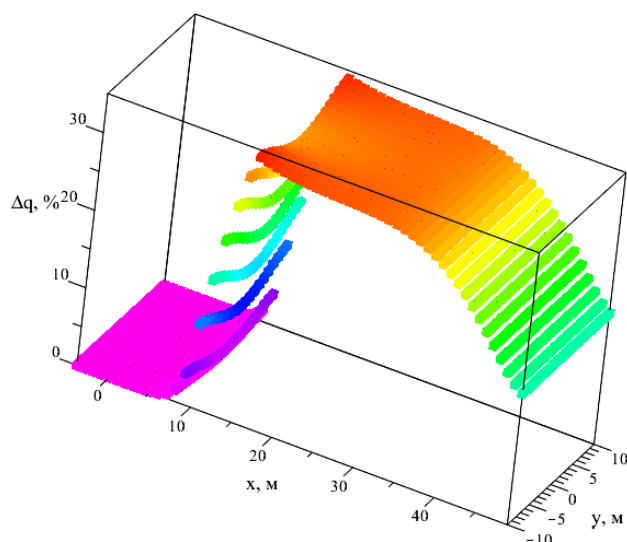


Рисунок 2.6. – Просторовий розподіл ефективності сорбції аміаку дрібнодисперсним потоком

Таким чином, розроблена математична модель розповсюдження небезпечного газу в атмосфері за його активного осадження водними аерозолями дозволяє підвищити точність розрахунків розподілу концентрації газу в атмосфері у процесі роботи 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 розробленої математичної моделі. Використання у процесі моделювання методу скінченних різниць дозволяє отримувати числові рішення просторового розподілу концентрації газу за умови його осадження струменем довільної інтенсивності та форми. Запропонований метод математичного опису процесу сорбції небезпечних газів дозволяє обирати довільну кількість та просторове розміщення вузлових точок, які задовольняють умову Куранта-Фрідрікса-Леві.

2.2. Розроблення керуючого алгоритму методики прогнозування хімічної обстановки у разі виникнення аварій з викидом небезпечних газів

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

У разі залучення оперативно-рятувальних підрозділів з локалізації НС, визначають такі параметри осадження, як інтенсивність подачі рідини, її дисперсність та можливі розміри зони осадження. Водночас, прогнозування розмірів зони ураження здійснюють за системою із трьох рівнянь (2.24), (2.30) та (2.39). У випадку відсутності достатньої кількості сил та засобів прогнозування, здійснюють за моделлю (2.24).

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

Алгоритм (рис. 2.7.) містить 9 блоків, розміщених на трьох ієрархічних рівнях, зв'язаних прямими зв'язками. На першому ієрархічному рівні розташовані 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 здійснення 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 розпорядженні сили та засоби цивільного захисту [18].

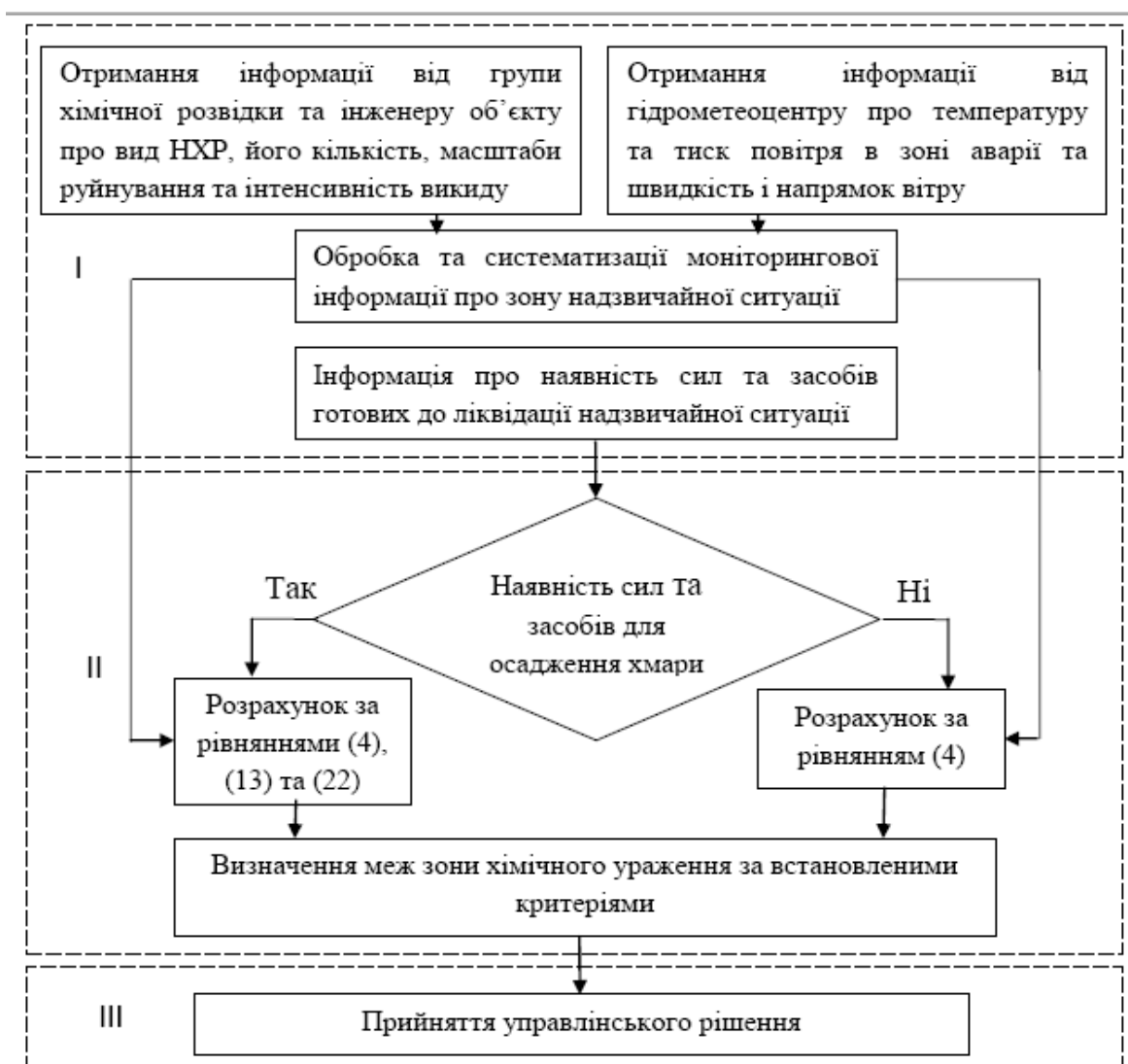


Рисунок 2.7. – Керуючий алгоритм методики прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів

На другому етапі відбувається розрахунок розмірів зон хімічного забруднення. Для цього керівник ліквідації НС повинен визначитись з критерієм безпеки. За умови виникнення НС такого класу, як критерій безпеки зазвичай обирають гранично допустиму концентрацію (ГДК) НХР. Після оцінювання наявних резервів оперативно-рятувальних сил, керівник ліквідації НС визначає можливість здійснення 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 такої моделі є технічні можливості оперативно-

рятувальних підрозділів для подавання розпиленої води. Технічні можливості щодо дальності подачі дрібнодисперсного струменя для лафетних стволів становить до 40 м в залежності від модифікації. Тобто у разі використання двох лафетних стволів на протилежних сторонах хмари, глибина зони осадження може складати до 80 м. Якщо розглядати технічні можливості щодо висоти подачі розпиленого струменя, то необхідно мати на увазі два варіанти подачі струменя – наземний та з використанням підіймачів. Наземний спосіб подачі розпиленого струменя здатен забезпечити висоту до 20 м. Використання механічних підіймачів дозволяє збільшити висоту подачі струменя до 50 м. Тобто розміри зони хімічного ураження для можливості використання розробленої моделі для прогнозування її розмірів повинні бути розташовані в межах по ширині до 80 м та висоті до 50 м в залежності від технічної можливості оперативно-рятувальних підрозділів. Таким чином, використання такої моделі доцільне, коли осадження здійснюють на початковій стадії аварії або поблизу зони викиду. Це відповідає дійсності, так як саме поряд із джерелом викиду оперативно-рятувальні підрозділи здійснюють роботи з рятування постраждалих та локалізації викиду НХР.

Розроблений алгоритм прогнозування зони хімічного ураження за активного осадження небезпечної хімічної речовини розпиленими струменями базується на послідовності трьох блоків – моніторингу зони надзвичайної ситуації, прогнозування наслідків надзвичайної ситуації та ухвалення управлінського рішення. Моніторинг зони надзвичайної ситуації містить збір та оброблення даних щодо метеорологічних умов в зоні аварії, характеру пошкодження технологічного обладнання, виду та кількості небезпечної хімічної речовини, наявних у розпорядженні сил та засобів служб цивільного захисту. Блок прогнозування містить введення отриманих вхідних параметрів та розрахунок розмірів зони хімічного ураження в залежності від кількості та послідовності етапів розповсюдження та осадження небезпечної речовини. Блок ухвалення управлінського рішення

передбачає визначення критерію небезпеки, 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 ухвалення управлінського рішення. Моніторинг зони надзвичайної ситуації передбачає збір та оброблення даних щодо метеорологічних умов в зоні аварії, характеру пошкодження технологічного обладнання, виду та кількості небезпечної хімічної речовини, наявних у розпорядженні сил та засобів всіх служб цивільного захисту. Блок прогнозування передбачає введення отриманих вхідних параметрів та розрахунок розмірів зони хімічного ураження в залежності від кількості та послідовності етапів розповсюдження та осадження небезпечної речовини. Блок ухвалення управлінського рішення передбачає визначення критерію небезпеки, географічного розташування границь зони ураження та визначення заходів щодо ліквідації аварії та евакуації населення.

2.3. Розроблення програмної реалізації методики прогнозування хімічної обстановки у разі виникнення аварій 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 у разі виникнення аварій з викидом небезпечних газів. Методика реалізована у вигляді програмного продукту «Прогноз НХР» (рис. 2.8.).

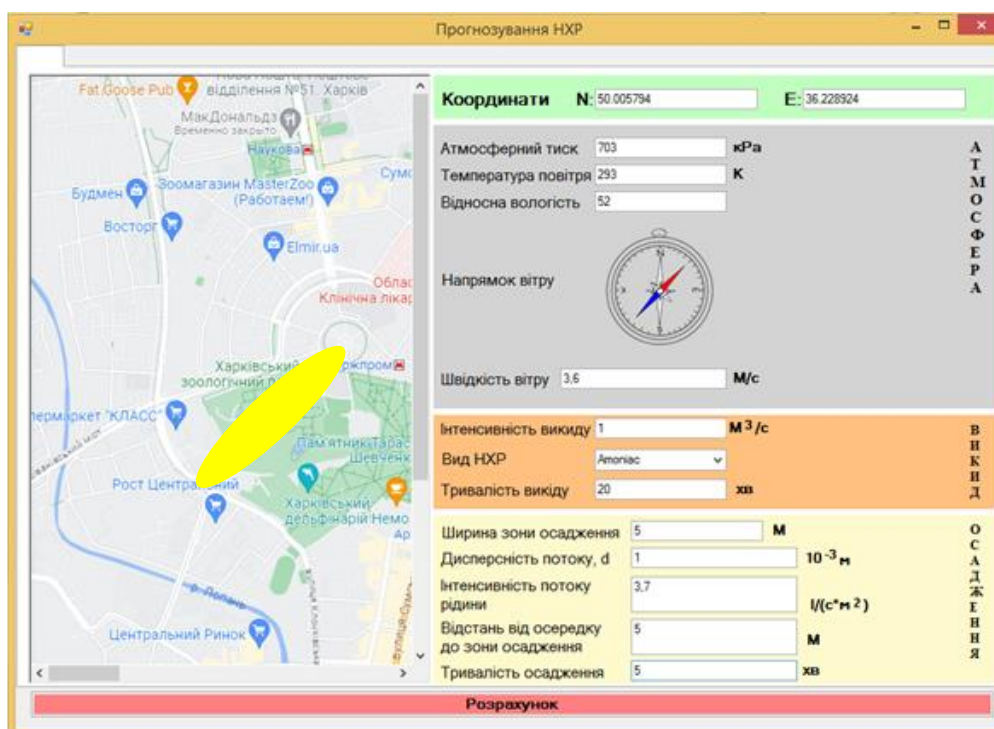


Рисунок 2.8. – Інтерфейс програмного комплексу «Прогноз НХР»

Інтерфейс програмної реалізації розробленої методики прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів умовно поділений 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 заносять в окрему область у правій верхній частині інтерфейсу.

Окремим блоком інтерфейсу є блок «Атмосфера», в який вносять 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. Після прибуття 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 здійснення розвідки місця аварії за допомогою представника підприємства або спеціального маркування та візуального контролю визначає вид небезпечного газу та оцінює інтенсивність його викиду. Ці данні вносять до програмного комплексу «Прогноз НХР».

3. Співробітники штабу за допомогою портативної метеостанції, яка є штатним обладнанням в 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 отримують необхідні дані. В цьому випадку отримані дані будуть менш точними, так як вони виміряні на найближчому пункті спостереження, а не безпосередньо в зоні аварії.

4. Керівник ліквідації аварії здійснює оцінювання доступних сил та засобів для виконання осадження небезпечної хмари та за наявності відповідних ресурсів відповідає за організацію рятувальників із розпилюючими стволами для осадження хмари.

5. Враховуючи кількість розпилюючих стволів та їх тактико-технічні характеристики 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 виконує прогнозування та наносить результати на карту.

7. Керівник ліквідації надзвичайної ситуації здійснює оцінювання результатів прогнозування та ухвалює управлінське рішення щодо зміни позиції рятувальників, збільшення або зменшення кількості стволів, що подано на осадження та за необхідності здійснення евакуації із прилеглих територій.

Таким чином, розроблено програмну реалізацію 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 за розділом 2

1. Розроблена математична модель розповсюдження небезпечного газу в атмосфері за його активного осадження водними аерозолями дозволяє підвищити точність розрахунків розподілу концентрації газу в атмосфері під час роботи 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 розробленої математичної моделі. Використання у процесі моделювання методу скінченних різниць дозволяє отримувати числові рішення просторового розподілу концентрації газу за умови його осадження струменем довільної інтенсивності та форми. Запропонований метод

математичного опису процесу сорбції небезпечних газів дозволяє обирати довільну кількість та просторове розміщення вузлових точок, які задовольняють умову 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 ухвалення управлінського рішення. Моніторинг зони надзвичайної ситуації передбачає збір та оброблення даних щодо метеорологічних умов в зоні аварії, характеру пошкодження технологічного обладнання, виду та кількості небезпечної хімічної речовини, наявних у розпорядженні сил та засобів служб цивільного захисту. Блок прогнозування передбачає введення отриманих вхідних параметрів та розрахунок розмірів зони хімічного ураження в залежності від кількості та послідовності етапів розповсюдження та осадження небезпечної речовини. Блок ухвалення управлінського рішення передбачає визначення критерію безпеки, географічного розташування границь зони ураження та визначення заходів щодо ліквідації аварії та евакуації населення.

3. Розроблено програмну реалізацію 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 ДОСТОВІРНОСТІ МЕТОДИКИ ПРОГНОЗУВАННЯ ХІМІЧНОЇ ОБСТАНОВКИ У РАЗІ ВИНИКНЕННЯ АВАРІЙ З ВИКИДОМ НЕБЕЗПЕЧНИХ ГАЗІВ

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

Здійснено 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 виконано перевірку розробленої методики прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів.

Основні результати розділу представлені в публікаціях [19, 20, 26, 30,].

3.1. Розроблення лабораторної установки та методики здійснення досліджень динаміки осадження небезпечних газів дисперсними потоками

Так як процеси осадження газів дрібнодисперсними струменями належать до масообмінних процесів, то 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 протитечійна масо- та теплообмінна колона, яка є циліндричним корпусом 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 призводить до виносу рідинного аерозолі потоком газу, порушення рівномірності розподілу рідини по об'єму камери; також існують обмеження щодо дисперсності рідинного аерозолі.

Недолік виносу крапель рідини газовим потоком вирішено за рахунок використання прямопоточного абсорберу, який містить корпус, штуцер входу та виходу газу та штуцер входу та виходу рідини (абсорбенту), розподілювач потоку рідини, масообмінну секцію, каплевідбійник [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. До того ж в абсорбері відсутня вимірювальна газоаналізуюча апаратура для контролю процесу абсорбції та можливість зміни дисперсності аерозолі. Також ця конструкція не дозволяє досліджувати процеси осадження твердих продуктів горіння.

Найбільш близьким до зазначених вище вимог є камера для дослідження процесів масообміну, яка містить вертикальний герметичний корпус, вентилятор, запірну арматуру, форсунки для подачі води, газоаналізатори та відсік для горіння [114].

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

В основі розробленої експериментальної установки є завдання створення камери для дослідження процесів сорбції газів, яка дозволить моделювати умови контакту рідинних аерозолів та газів (парів) за різних фізико-хімічних умов процесу, яка не матиме вищенаведених недоліків, тобто забезпечуватиме горизонтальне розповсюдження газів за різної швидкості повітряного потоку, забезпечити подачу рідинного аерозолі в

довільному місці на шляху розповсюдження газу та надати змогу виміру просторового розповсюдження газу за трьома координатами (рис. 3.1.).

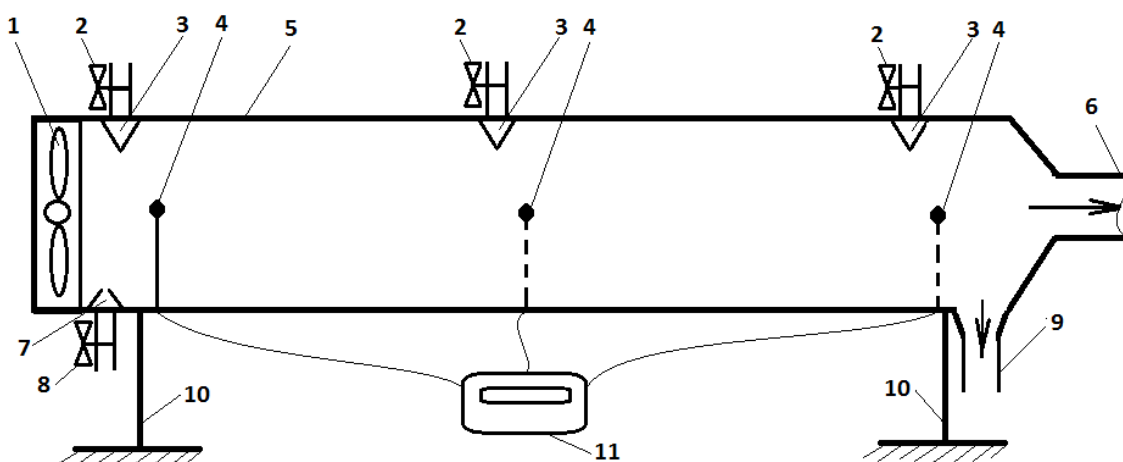


Рисунок 3.1. – Схема камери для дослідження процесів сорбції газів: 1 – вентилятор; 2 – рідинні запірні крани; 3 – рідинні форсунки; 4 – газоаналізатори; 5 – корпус; 6 – відвідний газовий патрубок; 7 – газова форсунка; 8 – газовий запірний кран; 9 – відвідний рідинний патрубок; 10 – кріплення; 11 – блок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

Вирішення цієї проблеми полягає в наступному: камера, що використовують для дослідження процесів сорбції газу, яка має циліндричну форму і виконана в герметичному варіанті, розташована у вигляді горизонтальної труби. Як розпилювач використовують з’ємні цільнофакельні форсунки з регулюванням інтенсивності та дисперсності потоку. З одного боку камера додатково обладнана 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. У верхній частині камери розташовані з’ємні цільнофакельні рідинні форсунки 3 з можливістю регулювання інтенсивності та дисперсності потоку. З’ємне виконання

рідинних форсунок дозволяє змінювати місце розташування та їх кількість, що дає змогу досліджувати процеси сорбції газів рідинними аерозолями різної інтенсивності на різних етапах розповсюдження газової хмари. Рідинні форсунки 3 обладнані рідинними запірними кранами 2 для регулювання потоку рідини. Для моделювання газового потоку по об'єму камери з одного боку корпусу 5 встановлено повітряний вентилятор 1 зі змінною інтенсивністю обертання. Протилежний бік корпусу 5 обладнано патрубком 6 для відведення газового середовища із камери до небезпечного місця. Встановлені в довільному місці корпусу 5 газоаналізатори 4 дозволяють контролювати концентрацію газу в об'ємі камери. Кількість та місце розміщення газоаналізатору може бути змінене [19]. Дані від мережі газоаналізаторів надходять до блоку індикації 11, де їх обробляють та візуалізують. 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. Відпрацьовану рідину зливають з камери крізь відповідний рідинний патрубок 9.

Методика здійснення експериментальних досліджень на установці (рис. 3.1.) є наступною. Крізь форсунку 7 в камеру 5 подають газ, що досліджують. Інтенсивність подачі газу регулюють газовим запірним краном 8. Швидкість руху газу вздовж камери 5 регулюють обертами вентилятора 1, який ініціює рух газу від форсунки 7 до патрубку 6 для відведення газового середовища із камери у небезпечне місце, наприклад під витяжну шафу. Горизонтальний розподіл концентрації газу вимірюють газоаналізаторами 4, розміщеними уздовж камери 5. Дані вимірів газоаналізаторів 4 надходять до блоку індикації 11. Вздовж корпусу 5 встановлені рідинні форсунки 3, крізь які подають рідинний потік в об'єм камери. За допомогою форсунок 3 змінюють дисперсність потоку, а інтенсивність рідинного потоку регулюють запірними кранами 2. Відпрацьована рідина стікає по нижній частині камери до відповідного рідинного патрубку 9. Під час проходження газової хмари крізь рідинний аерозольний потік відбувається сорбція газу, інтенсивність процесу

сорбції визначають порівнянням розподілу концентрації газової хмари за всіх рівних умов, 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 дозволяють габарити експериментальної установки.

У майбутньому рекомендовано встановити 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 зумовлює те, що розподіл концентрації газу по висоті камери несуттєвий і вимір об'ємного розподілу не дасть адекватних результатів. У процесі створення лабораторної установки з діаметром газової камери $> 0,3$ м облаштування мережі газоаналізаторів дозволить досліджувати динаміку розподілу газу за всіма трьома координатами, 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 $> 29 \text{ кг/м}^3$, 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 у разі зміни кута нахилу розробленої камери [19].

Розроблена камера дозволяє імітувати розповсюдження газів в повітрі технологічного апарату та довільне розповсюдження в атмосфері. Під час вибору граничних значень швидкості нагнітання повітря та інтенсивності подачі рідини слід звертати увагу на габаритні властивості розробленої установки. Зазначені вище параметри обирають з урахуванням інертності спрацювання газоаналізаторів. Тобто динаміка просторової зміни концентрації газу в камері не повинна перевищувати інерційності роботи газоаналізаторів. Відповідно, збільшення розмірів експериментальної камери

дозволить розширити граничні значення параметрів, що досліджують.

Запропонована методика є послідовністю дій дослідника для якісного виміру просторового розподілу концентрації газів із врахуванням особливостей камери. Під час здійснення дослідження 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 розпилюючих форсунок для подачі дрібнодисперсного потоку рідини. Встановлено, що осаджувальні рідини можна використовувати у чистому вигляді, а також у вигляді рідких сумішей і розчинів. Конструкційні особливості розробленої камери дозволяють забезпечити належну безпеку дослідників за умови роботи з небезпечними газами. Можливості дослідження сорбційних процесів забезпечують швидкість 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 здійснено розрахунково-експериментальний порівняльний аналіз впливу інтенсивності потоку аерозолі 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 (зокрема 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. Верхня частина камери вирізняється наявністю поодиноких знімних форсунок, що розташовані згідно з планом на рис. 3.2. Подачу рідини до агрегату здійснюють за допомогою штуцерів, обладнаних запірною арматурою та витратоміром рідини. Інтенсивність і розподіл потоку рідкого аерозолю можна регулювати шляхом заміни форсунок з різними геометричними параметрами, а також окремих форсунок в ковпачку і зміною швидкості потоку рідини. У верхній частині камери встановлена форсунка із запірною арматурою та ультразвуковий дифузор для введення в об'єм камери дрібнодисперсного рідкого аерозолю 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 визначати середню об'ємну концентрацію поглиненого газу. Для контролю інтенсивності масообміну та відбору поглинаючих проб у нижній частині камери встановлюють трубку із запірною арматурою. Введення газу (пари) в об'єм камери, оснащеної запірним клапаном і витратоміром, здійснюють за допомогою форсунок. Дослідження здійснюють як після встановлення стабільної концентрації в об'ємі камери, так і в нестаціонарному стані.

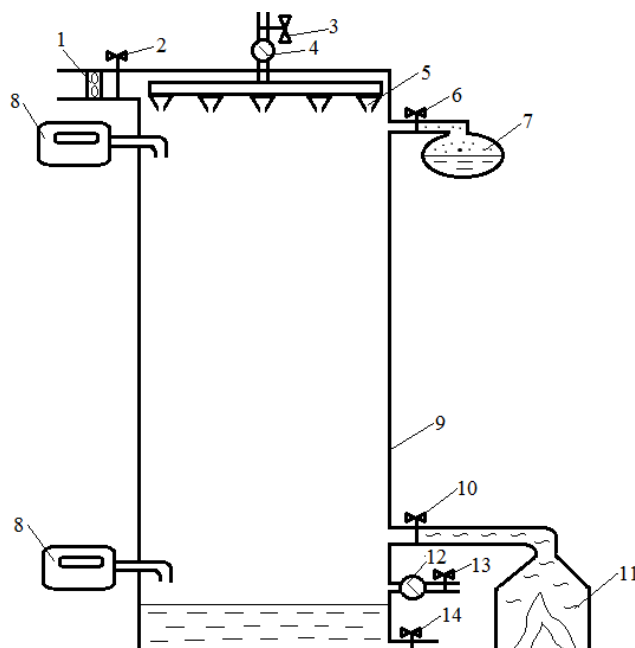


Рисунок 3.2. – Схема лабораторної установки для дослідження процесів сорбції газів:

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 бути розподілені 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 здійснювали в серії з трьох експериментів, в яких визначали середнє значення даних, що вимірюють. 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 за однакової 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].

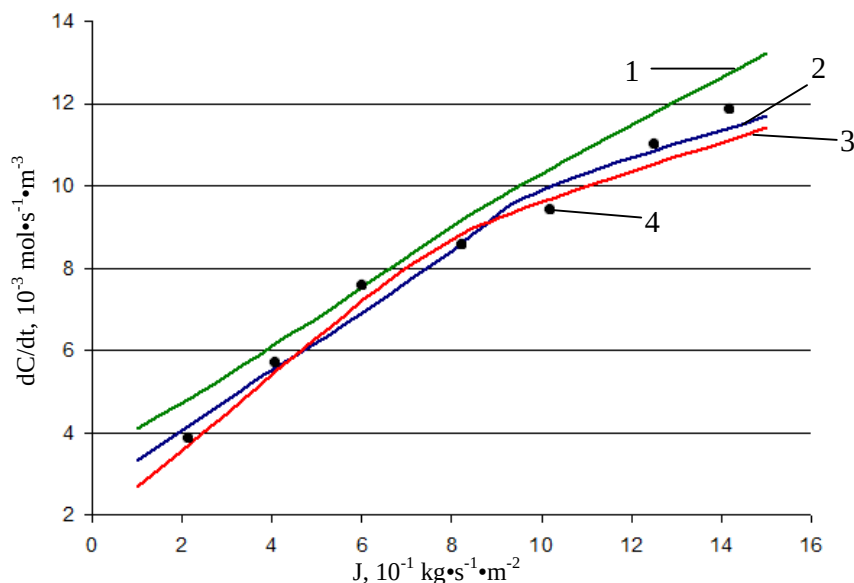


Рисунок 3.3. – Швидкість поглинання хлору водним аерозолем за різної інтенсивності потоку: 1 – розрахунок за критеріальним рівнянням; 2 – розрахунок за допомогою доповненої поетапної моделі; 3 – розрахунок за допомогою симуляційної математичної моделі MD; 4 – експериментальні дані

Враховуючи аналіз теоретичних та експериментальних результатів можна дійти висновку, 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 $8,7 \cdot 10^{-1} \text{ кг} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$. Іншим важливим моментом поетапної моделі сорбції є те, що вона дозволяє врахувати більшість основних фізико-хімічних закономірностей сорбції. Водночас комплементарна ступінчаста модель 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 узгоджені з розрахунковими даними (рис. 3.3.) і експериментальними даними 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.

Перевірку адекватності моделі здійснювали за критерієм Фішера:

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

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.

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

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.). За такої умови передбачено, що весь газ рівномірно розподілений у поверхневому шарі висотою 5 м.

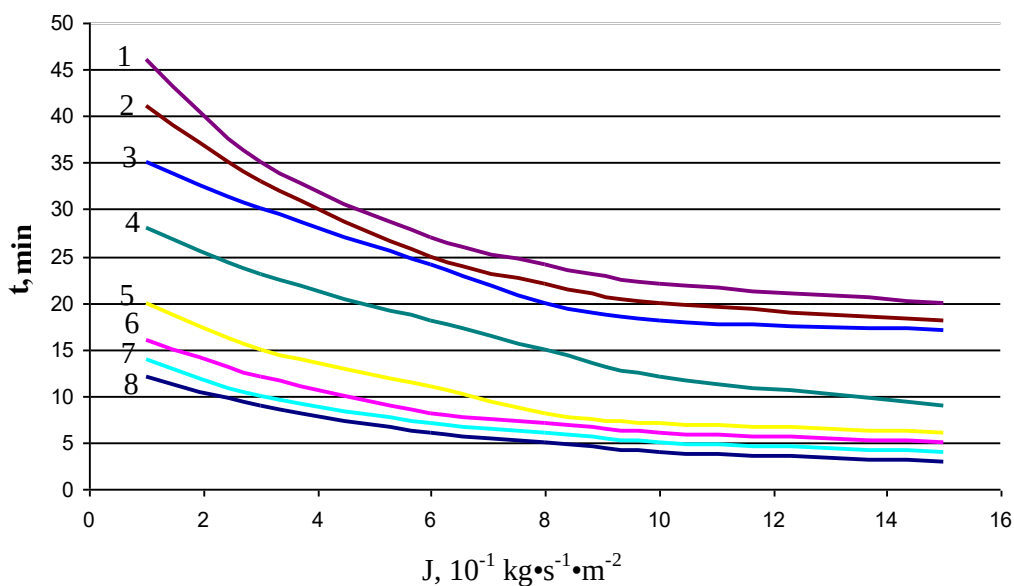


Рисунок 3.4. – Залежність часу осадження небезпечних газів з атмосфери від інтенсивності дисперсного потоку: 1 – NO_2 ; 2 – Cl_2 ; 3 – H_2S ; 4 – SO_2 ; 5 – HCN ; 6 – COCl_2 ; 7 – HCl ; 8 – NH_3

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. Найбільшу ефективність седиментації спостерігають у разі забруднення атмосфери аміаком, що пояснюють найвищою розчинністю аміаку серед досліджуваних газів. Слід зазначити низьку інтенсивність змивання хлору та сірководню, що належать до II класу шкідливості.

У роботі модифіковано покрокову модель процесу адсорбції газоподібних шкідливих речовин дрібнодисперсним водяним туманом, що містить 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 за однакової інтенсивності потоку дрібнодисперсний потік з великою концентрацією крапель і специфічною поверхнею розділу засвоюють 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 у процесі ліквідації 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 у разі виникнення аварій з викидом небезпечних газів

Відповідно до методики планування та здійснення експериментів [20], дослідження щодо встановлення впливу осадження газу на динаміку його просторового розповсюдження здійснювали у трьох вимірах за однакових умов. У випадках, коли суттєвих відхилень у трьох вимірах не спостерігали, для подальшого аналізу обирали середнє значення. Якщо викиди перевищували 25 %, початкове значення не враховували і здійснювали додаткове вимірювання. Дисперсність водяного потоку складала 1 мм. Дослідження передбачало систематичну зміну двох параметрів: швидкості повітряного потоку та інтенсивності дисперсного потоку. З метою забезпечення безпеки роботи із небезпечними отруйними речовинами

експериментальні дослідження здійснювали у засобах індивідуального захисту та у лабораторних умовах із постійним відводом забрудненого повітря (рис. 3.5.).



Рисунок 3.5. – Заходи безпеки у процесі здійснення експериментальних досліджень

З метою вирішення цієї задачі здійснено експеримент типу 2^2 . Для побудови полінома другого порядку використовували метод 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 пояснюють необхідністю забезпечення виконання досліджень за значень у критичних точках, які становлять $\pm \sqrt{2}$.

Верхнє значення швидкості повітряного потоку пов'язане із результатами аналізу погодних умов на території України, згідно з яким $\sim 80\%$ 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 щодо визначення 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.

Графічну інтерпретацію отриманих експериментальних даних із співставленням з результатами розрахунків за моделлю [17] представлено на рис. 3.6.

Таблиця 3.2. - Результати досліджень щодо осадження аміаку

Експеримент	$X_1(v)$	$X_2(I)$	Концентрація газу (експеримент) $q_e, \text{г/м}^3$	Концентрація газу (розрахунок) $q_m, \text{г/м}^3$
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

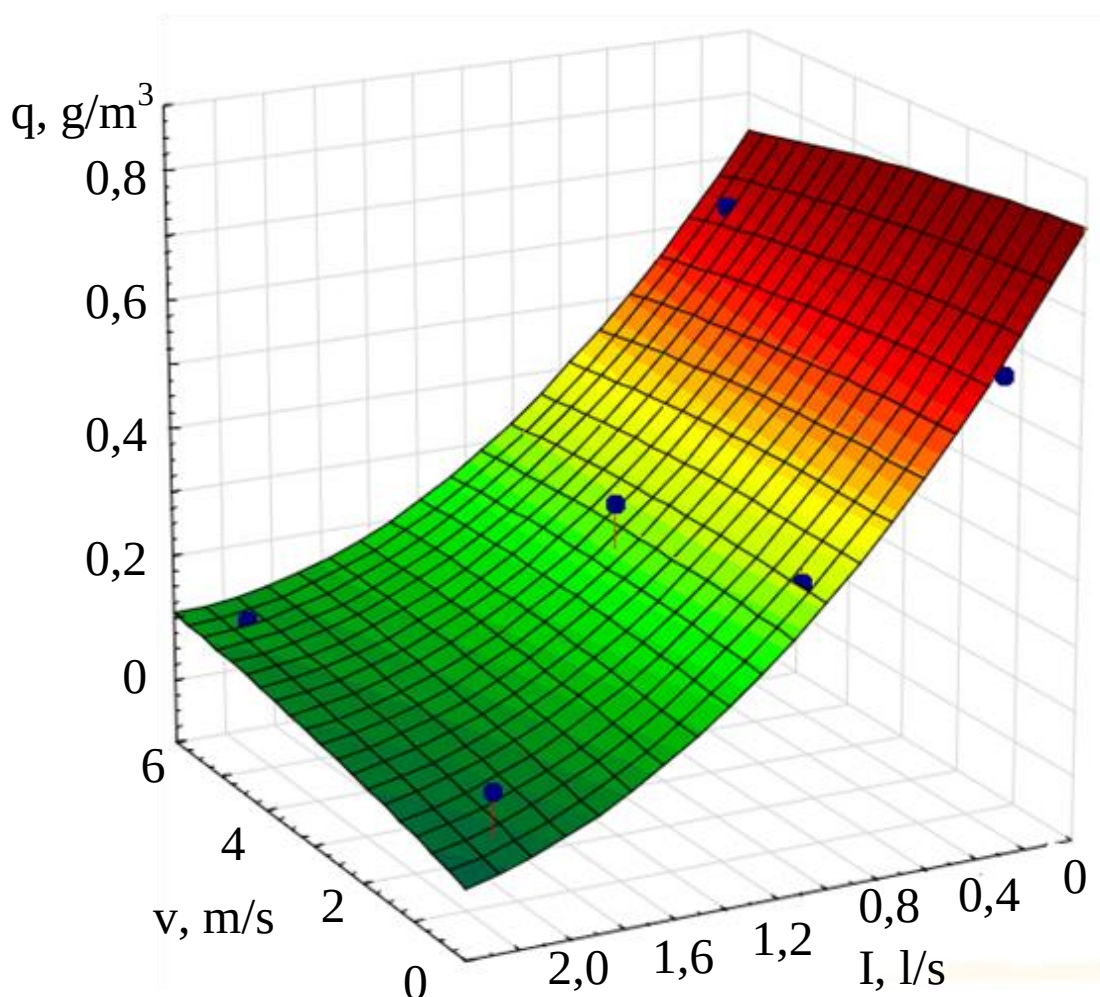


Рисунок 3.6. – Розподіл концентрації аміаку за різної швидкості повітряного потоку (v) та інтенсивності дисперсного потоку рідини (I): поверхня – розрахункові дані за моделлю [16]; крапки – експериментальні дані

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

Перевірку адекватності моделі здійснювали 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 показали суттєвий вплив наявності дисперсного осадження газу водою, що дозволяє знизити концентрацію газу у 15–17 разів. Таку високу інтенсивність осадження пояснюють 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 у процесі здійснення експериментальних досліджень та враховувати за умови 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 запропонованого компонування 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 оброблення сигналу. Також підвищити точність вимірювань дозволить збільшення габаритних розмірів експериментальної камери.

Таким чином, здійснено експериментальні дослідження просторового розподілу аміаку за різної інтенсивності повітряного потоку та різної інтенсивності дисперсного потоку води за умови осадження. 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. Оцінювання ефективності методики прогнозування хімічної обстановки у разі виникнення аварій з викидом небезпечних газів

Методика прогнозування ефективності ліквідації аварій з викидом небезпечних газів, розроблена на основі попередніх досліджень та експериментально перевіреної моделі прогнозування масштабів хімічного ураження, враховує процеси осадження небезпечної хмари та передбачає виконання трьох основних процедур.

На першому етапі здійснюється моніторинг епіцентру аварії та зони поширення хмари забруднення. Для цього використовуються стаціонарні системи моніторингу стану атмосферного повітря, хімічна розвідка на місці аварії, а також лідарні системи на безпілотних літальних апаратах, що дозволяють отримувати дані про концентрацію та динаміку поширення НХР.

Другий етап передбачає прогнозування інтенсивності осадження небезпечного газу та визначення потенційних наслідків викиду. Для цього аналізуються метеорологічні умови, такі як швидкість і напрямок вітру, вологість і температура повітря, а також оцінюється здатність дисперсних потоків до осадження хімічних речовин. На основі отриманих даних проводиться розрахунок розмірів зони ураження із застосуванням математичних моделей прогнозування.

На третьому етапі керівник аварійно-рятувальних робіт ухвалює рішення щодо розташування сил і засобів ліквідації наслідків аварії, організації евакуації населення та проведення заходів із нейтралізації хімічного забруднення. До таких заходів належать використання спеціальних сорбентів, зрошення водою або іншими реагентами для осадження небезпечних речовин, а також контроль поширення забруднення через системи оповіщення та блокування небезпечних ділянок.

Запропонована методика дозволяє оперативно оцінювати ситуацію, прогнозувати розвиток подій та ефективно планувати заходи з ліквідації наслідків аварій, що значно підвищує рівень безпеки як для населення, так і для рятувальних підрозділів.

З метою перевірки ефективності практичного використання запропонованої методики здійснено порівняльний аналіз основних параметрів аварії з викидом аміаку (табл. 3.3.). Як основу обрано опис ліквідації реальної хімічної аварії, що відбулася 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 року та з результатами прогнозування за запропонованою в роботі методикою [29].

Таблиця 3.3. - Порівняльні дані 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, які потрапили 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 дані в описі аварії на «Стирол» взяті за результатами здійснення 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 обумовлено тим, що в запропонованій методиці використовують математичну модель на

основі гаусової моделі дифузії газів, тоді як затверджена методика заснована на табуюльованих значеннях розмірів зони із певним кроком. Додатковим фактором є навмисне завищення результатів прогнозування в затвердженій методиці із врахуванням коефіцієнту безпеки.

За умови 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 у процесі розрахунку 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. За умови розрахунків за запропонованою методикою прогнозованої зони ураження у разі використання 5 стволів «Б», отримали площу, на 27 % меншу від реальної, що пояснюють оптимізацією розміщення рятувальників по площі ураження та можливістю ближчого розміщення ланок для осадження небезпечної хмари.

Порівняльний аналіз даних щодо кількості постраждалих у зоні хімічного забруднення свідчить про трикратну розбіжність між запропонованою та затвердженою методикою. Таку значну розбіжність можна пояснити методологією підрахунку кількості жертв, яка враховує щільність населення, що відповідає житловим районам. Водночас переважна територія зони ураження була розташована 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 за умови реальної аварії, та на 90-180 % від прогнозованого часу за затвердженою методикою.

Основною перевагою та особливістю запропонованої методики є врахування процесів осадження газової хмари за довільної форми зони осадження. Однак розробленій методиці притаманне таке обмеження як

висота зони осадження. Хоча математична модель здатна працювати за довільної висоти 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: здійснення моніторингу епіцентру викиду небезпечної хімічної речовини та зони розповсюдження хмари; прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів з урахуванням наявних ресурсів; ухвалення управлінського рішення щодо ліквідації надзвичайної ситуації, дозволяє підвищити точність прогнозування зони хімічного ураження без осадження на 16 % та за умови активного осадження у 4 рази. Це дозволяє суттєво підвищити ефективність ліквідації хімічних аварій за рахунок більш інтенсивного осадження за умови мінімізації безпечної відстані для рятувальників та оптимізації інтенсивності подачі дисперсного потоку.

Висновки за розділом 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 розпилюючих форсунок для подачі дрібнодисперсного потоку рідини. Чисті рідини, а також рідинні суміші та розчини можуть бути використані як рідини для осадження. Конструкційні особливості розробленої камери дозволяють забезпечити належну безпеку дослідників у процесі роботи з небезпечними газами. Можливості дослідження сорбційних процесів забезпечують для швидкості повітряного потоку в діапазоні від 0 до 6 м/с та дисперсності рідинного потоку до 0,1 мм.

2. Здійснено експериментальні дослідження просторового розподілу аміаку за різної інтенсивності повітряного потоку та різної інтенсивності дисперсного потоку води у процесі осадження. 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: здійснення моніторингу епіцентру викиду небезпечної хімічної речовини та зони розповсюдження хмари; прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів з урахуванням наявних ресурсів; ухвалення управлінського рішення щодо ліквідації надзвичайної ситуації дозволяє підвищити точність прогнозування зони хімічного ураження без осадження на 16 % та за умови активного осадження у 4 рази. Це дозволяє суттєво підвищити ефективність ліквідації хімічних аварій за рахунок більш інтенсивного осадження у разі мінімізації безпечної відстані для рятувальників та оптимізації інтенсивності подачі дисперсного потоку.

РОЗДІЛ 4.

ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО ПРАКТИЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ МЕТОДИКИ ПРОГНОЗУВАННЯ ХІМІЧНОЇ ОБСТАНОВКИ У РАЗІ ВИНИКНЕННЯ АВАРІЙ З ВИКИДОМ НЕБЕЗПЕЧНИХ ГАЗІВ

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

Під час розроблення методики прогнозування рівня хімічного ураження необхідно дотримуватись принципів поетапності дій та міжрівневих прямих та зворотних зв'язків. Водночас за кожний окремий етап можуть відповідати різні служби та виконавці, однак їх взаємодію координує загальний оперативно-рятувальний штаб.

Першим етапом методики є здійснення моніторингу зони надзвичайної ситуації. Структура моніторингу надзвичайних ситуацій має три рівні [116]. До першого рівня належать пристрої реєстрації небезпечних факторів або метеорологічних параметрів (Рис. 4.1.).



**Рисунок 4.1. – Стаціонарний комплекс метеорологічного контролю та контролю
хімічного стану повітря**

Такі прилади можуть застосовувати як для реєстрації одного параметра, так і декількох параметрів паралельно. Оскільки контроль параметрів необхідно здійснювати в різних точках простору, то пристрої контролю можуть бути розосереджені 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.).

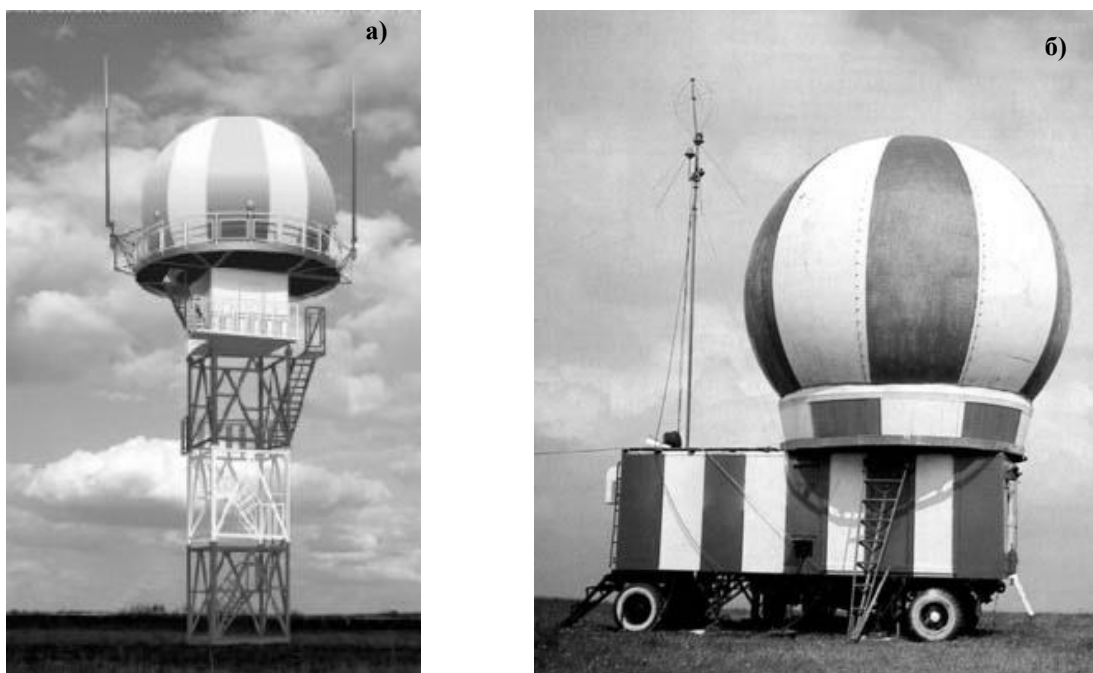


Рисунок 4.2. – Стационарне (а) та мобільне (б) розміщення МРЛ

Метеорологічні радіолокатори та автоматизовані метеорологічні радіолокаційні комплекси призначені для виявлення місця розташування купчастих, купчасто-дощових та шарувато-дощових хмар та пов'язаних з ними небезпечних для авіації метеорологічних явищ (гроза, дощ, турбулентність,

зрушення вітру тощо), 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, доступний в стаціонарному та пересувному варіантах комплектування (на причепі) (рис. 4.2.).

Автоматизовані метеорологічні радіолокатори (АМРК) обладнані системами, які полегшують автоматизоване оброблення та передавання даних, отриманих з радарів (рис. 4.3.).

Антенна МРЛ містить великий та малий параболічні відбивачі та здвоєний двохдіапазонний опромінювач. Діапазон 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.

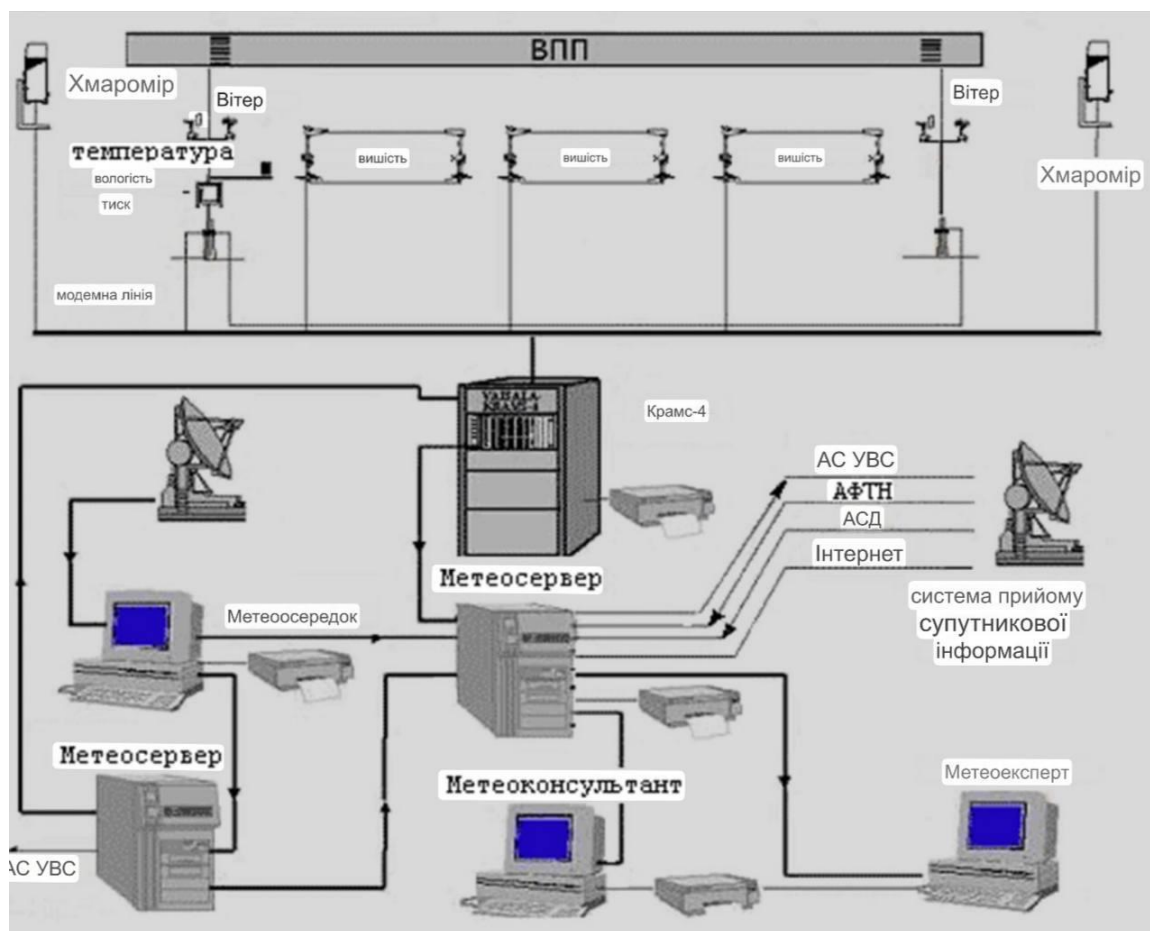


Рисунок 4.3. – Комплексна схема АМРК

Отриману засобами контролю параметрів первинну інформацію за допомогою кабелів або радіоканалів передають до приладів другого рівня, які призначені для оброблення отриманої інформації та надання її на третій рівень у зручній формі. На третьому рівні здійснюють аналіз отриманої інформації та ухвалюють рішення про подальші дії з ліквідації НС.

З розвитком технологій зв'язку та телекомунікацій існує можливість об'єднання систем моніторингу декількох держав, таким чином створюють глобальну систему моніторингу міжнародного рівня [119]. Зі збільшенням рівня системи моніторингу значно ускладнена структура побудови системи, а саме підсистеми оброблення, аналізу та систематизації інформації. Існують два підходи до побудови систем моніторингу регіонального, державного та міжнародного рівнів [120]. До першого належить розроблення технічної бази, яку відразу орієнтовано на моніторинг зони значних розмірів. До таких систем насамперед належать супутникові системи моніторингу. У другому підході реалізують принцип об'єднання та систематизації даних із приладів моніторингу об'єктового рівня. Такі приладів контролю дають змогу побудувати систему моніторингу регіонального та державного рівнів [121].

Крім рівневої градації, системи моніторингу можна поділити за основними принципами збору інформації (рис. 4.4.).

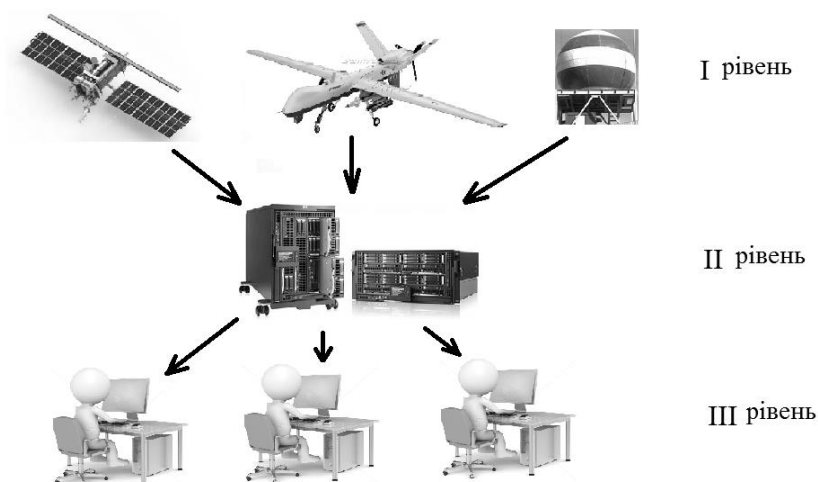


Рисунок 4.4. – Класифікація систем моніторингу зони НС та метеообстановки

До першого класу систем належать 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. За такої умови контролюють фізичні, хімічні, біологічні та геометричні параметри зони моніторингу [124, 125].

Розроблення супутникових систем моніторингу здійснюють в державах Європейського союзу за програмою GMES, що використовує супутники «Envisat» та «Metop». Супутниковий моніторинг метеорологічної обстановки на планеті здійснюють з метою виявлення швидкості та напрямку вітру, вологості та температури [126, 127].

В галузі розроблення 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» [130]. Вказана система координує роботу військової (DMSP) та цивільної (NOAA) супутникових систем, а також містить супутники «Wind», «Coriolis», «Terra», «Aqua» (рис. 4.5.) [131].

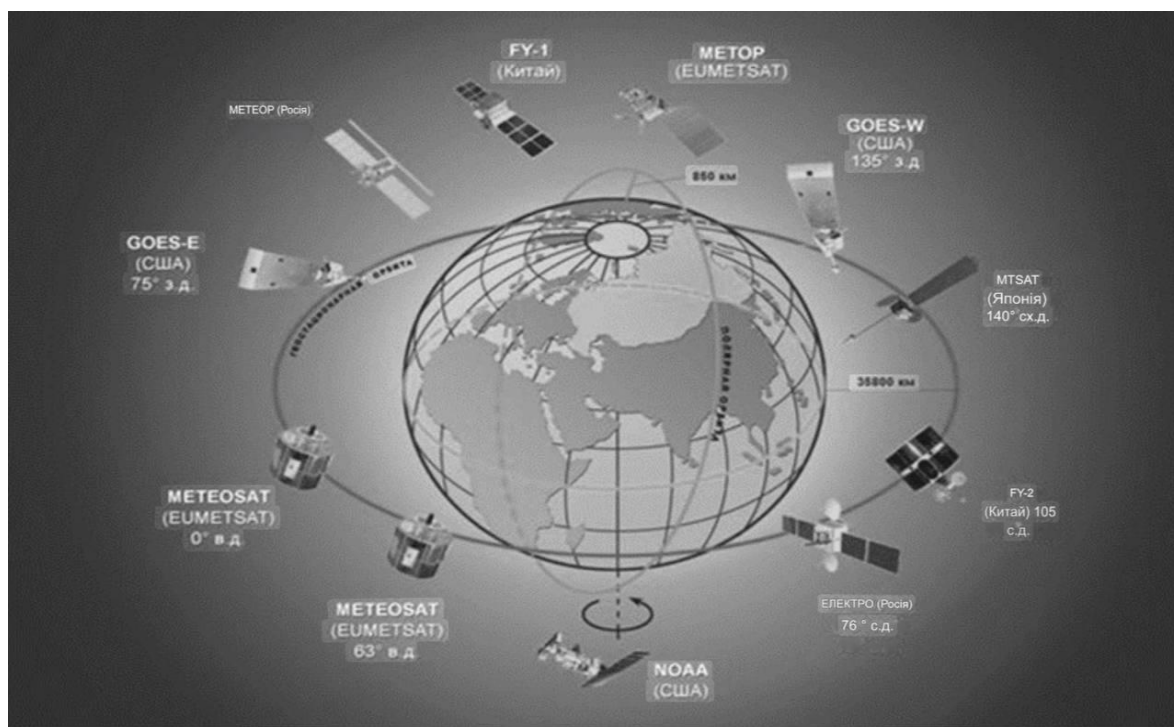


Рисунок 4.5. – Міжнародне угруповання метеосупутників

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 низкою істотних недоліків щодо 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.

Усунення недоліків космічних систем моніторингу дозволяє використовувати наземні системи моніторингу. Крім того, використання таких систем має значну економічну перевагу під час експлуатації устаткування.

Зазначені комплекси розробляють в різних країнах. У Великобританії використовують радіолокатор «Siemens Plessey 45C». У Німеччині

використовують 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. Водночас найбільш перспективними є безпілотні літальні апарати (БПЛА) (рис. 4.6.).

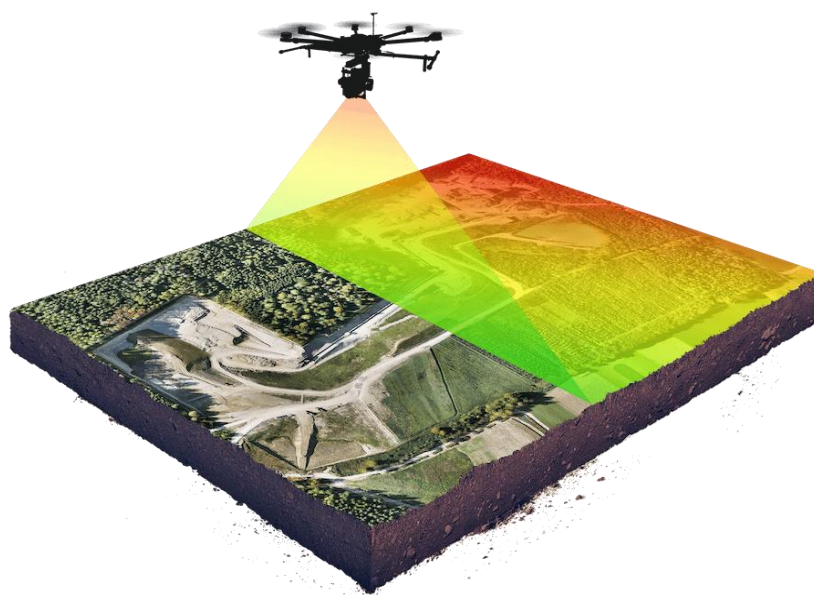


Рисунок 4.6. – Сучасні принципи використання БПЛА для розвідки зони НС

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 визначають специфіку їхнього використання для моніторингу надзвичайних ситуацій. БПЛА літакового типу можуть бути використані для моніторингу хімічної обстановки. У цьому випадку реалізовано такі якості цього типу БПЛА, як висока швидкість та дальність

польоту (відповідно, більша площа моніторингу), водночас ці характеристики не знижують якість хімічного контролю.

Вантажопідйомність БПЛА вертолітного типу вище, ніж літакового, та досягає п'ятдесяти кілограмів корисного навантаження. Це дає можливість використовувати досить потужну приладову базу. Для моніторингу хімічного забруднення можливо застосовувати компактні лідарні комплекси. Лідарні комплекси обладнують 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 можливо використовувати 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 за умови активного осадження небезпечних газів, то можна дійти 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 належать до методу прогнозування. Вибір визначальних критеріїв, за якими здійснюють прогнозування, робить окрема особа або колективний орган, який має керівні повноваження. Тобто керівний орган визначає, за яких умов, та на який час розвитку аварії здійснюють прогнозування.

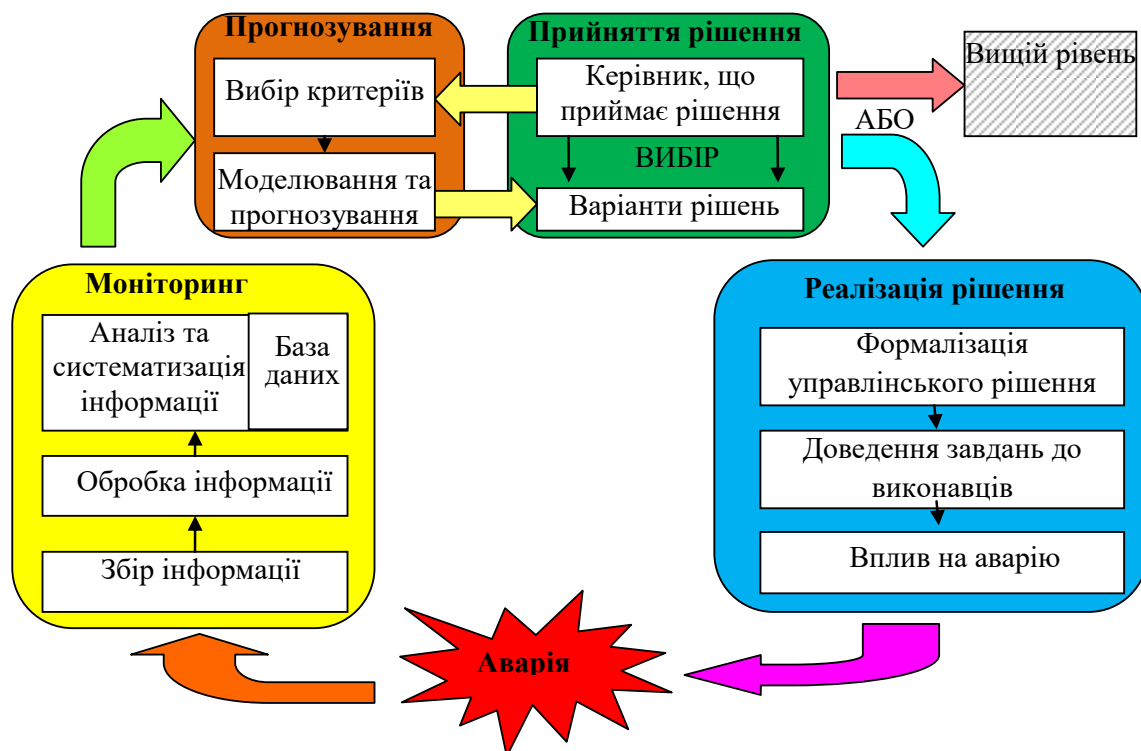


Рисунок 4.7. – Структура кризового управління під час ліквідації аварії

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, яка здійснює прогнозування, повинна знати переваги та недоліки кожного програмного комплексу та певні обмеження, які закладені в алгоритми розрахунку.

Згодом керівний орган розподіляє обов'язки, пов'язані з ліквідацією аварії, між виконавцями за умови наявності відповідних ресурсів. Передчасне та якісне прогнозування наслідків аварії дозволяє заздалегідь визначити потреби в людських, технічних та матеріальних ресурсах. За потреби додаткові ресурси керівний орган може запросити у вищій ланки управління.

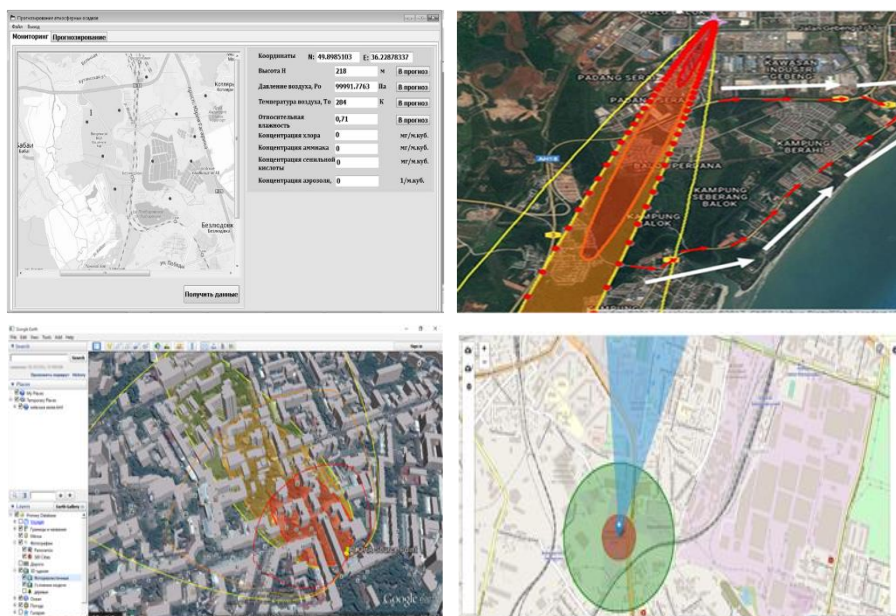


Рисунок 4.8. – Приклади результатів прогнозування різними програмними комплексами

Після активного впливу на зону аварії змінюють вхідні параметри для наступного етапу прогнозування. Тому моніторинг зони надзвичайної ситуації здійснюють безперервно під час процесу ліквідації наслідків аварії. Наступний етап прогнозування розвитку аварії з уточненими моніторинговими даними дозволяє оцінити керівнику правильність ухвалених управлінських рішень та якість виконання поставлених задач рятувальними службами. За необхідності здійснюють корегування елементів ліквідації наслідків надзвичайної ситуації.

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

Попереднє прогнозування здійснюють до виникнення аварійного викиду небезпечних газів. Умови, за яких таке прогнозування можливе, – це найбільш ймовірні умови гіпотетичної аварії. Попереднє прогнозування використовують як для потреб інженерного проектування, так і для планування дій екстрених служб.

За інженерного проєктування попереднє прогнозування використовують для визначення необхідної інтенсивності водяних завіс на виходах із технологічних приміщень, де виготовляють, зберігають та використовують небезпечні речовини. Прикладом такого проєктування є проєктування складу для зберігання хлору на водоочисних підприємствах.

Також попереднє прогнозування використовують для визначення безпечних відстаней забудови хімічно небезпечних об'єктів, норм забудови житлових будинків в 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 погоджують з усіма оперативно-рятувальними службами, що можуть бути задіяні для ліквідації наслідків надзвичайної ситуації. План такого характеру є керівним документом для штабу з ліквідації наслідків надзвичайної ситуації в організації взаємодії різних підрозділів у зоні надзвичайної ситуації.

Аварійне прогнозування здійснюють для оперативного передбачення розвитку аварії, що вже відбулася. Вихідними умовами для такого прогнозування є моніторингові дані, що зібрані під час розвідки місця виникнення аварії. Аварійне прогнозування здійснюють працівники оперативного штабу на місці аварії. Отримані за математичними моделями результати використовують 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 використовують для визначення кількості персоналу та населення, які потребують оперативної евакуації.

Запропонована методика дозволяє підвищити оперативність та зручність роботи штабу з ліквідації надзвичайних ситуацій та безпеку роботи

рятувальників в зоні викиду небезпечних речовин. Також запропонована методика дозволяє заздалегідь планувати евакуацію населення, яке може опинитися в небезпечних умовах.

Необхідно відмітити, що запропонована методика прогнозування рівня хімічного ураження атмосфери за умови активного осадження 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 передбачає здійснення 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. Розроблену методику рекомендують застосовувати в ситуаціях, коли ширина хмари не перевищує 20 метрів, а висота – 10 метрів, оскільки вона базується на характеристиках струменів, які можуть бути отримані за допомогою рятувального обладнання. Запропонована багаторівнева система моніторингу, яка містить технічні елементи збору, оброблення та передачі даних. Інтеграція запропонованої методології в загальну структуру управління надзвичайними ситуаціями полегшує оцінювання небезпеки в реалістичних умовах локалізації викиду. Підвищення точності та оперативності оцінювання небезпек за допомогою запропонованої методики дозволить підвищити безпеку роботи рятувальників в зоні аварії та заздалегідь організувати здійснення евакуації населення із зони надзвичайної ситуації.

4.2. Рекомендації керівникам ліквідації надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів

Під час розроблення практичних рекомендацій для керівників ліквідації надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних речовин були використані основні керуючі та нормативні документи ДСНС України, що регламентують роботу рятувальників в зоні хімічного забруднення. Дії оперативно-рятувальних підрозділів в зоні НС регламентує Статут дій у НС органів управління та підрозділів ОРС ЦЗ та Статут 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 регламентовано 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 здійснюють в найкоротші терміни.

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

Важливо зазначити, що працівники мають право виконувати аварійно-рятувальні роботи лише після ознайомлення з правилами охорони праці та

техніки безпеки, яке здійснюють акредитовані інженерно-технічні працівники об'єкту. Крім того, працівники повинні отримати письмовий наряд-допуск, в якому зазначено місце виконання робіт, їх зміст та необхідні заходи 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 оцінювання ситуації та ухвалення рішення щодо організації оперативних дій в зоні НС з моменту виїзду пожежно-рятувального підрозділу до ліквідації аварії здійснюють розвідку зони НС.

Алгоритм дій керівника ліквідації НС з викидом НХР:

1. Здійснити 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, долучити 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 здійснення 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 здійснення дегазації особового складу і техніки.

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

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

Розвідку необхідно здійснювати тільки в засобах індивідуального захисту з використанням відповідних приладів. Розвідку здійснюють як у пішому порядку, так і з використанням спеціальної техніки (УАЗ-469 РХ, БРДМ2РХ) (рис. 4.9.). Межі зон хімічного зараження позначають спеціальними знаками.



Рисунок 4.9. – Способи здійснення хімічної розвідки

Під час розвідки визначають:

- наявність, кількість і місця перебування людей, які є в зоні пожежі або поруч з об'єктом і можуть потрапити до зони хімічного забруднення, а також порядок здійснення їх евакуації в безпечні місця;
- вид і кількість НХР, які є в зоні пожежі або можуть там опинитися, їх основні фізико-хімічні, пожежовибухонебезпечні та токсичні властивості;
- наявність, кількість та місця розташування 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 поширення вогню або 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 передбачає [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 ліквідацію осередків ураження;

- здійснення 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'єктів, що підлягають дегазації, порядок та способи дегазації;

- розміщення пунктів приготування дегазуючих розчинів та зарядження 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 здійснення рятувальних та інших невідкладних робіт;

- визначає алгоритм евакуації постраждалих;
- визначає маршрути руху до осередку ураження.

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

Пошук потерпілих здійснюють переважно на робочих місцях, шляхах евакуації, на місцевості, починаючи з місць, розташованих поблизу епіцентру.

У випадках, коли відомо, що небезпечна хімічна речовина має більшу щільність, ніж повітря, пошук жертв, в першу чергу, здійснюють в підземних приміщеннях, таких як підвали, а також на менш піднесених ділянках місцевості.

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

Евакуацію постраждалих з небезпечної зони здійснюють найкоротшим шляхом до пункту прийому постраждалих.

З урахуванням специфіки хімічних аварій у процесі локалізації та ліквідації їх наслідків вживають заходи, які спрямовані на обмеження і припинення виливу (викиду) НХР, локалізації хімічного ураження, запобігання зараженню ґрунту і джерел водозабезпечення населення. Обмеження і припинення викиду (виливу) НХР здійснюють:

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



Рисунок 4.10. – Основні види запірної арматури на ємностях з НХР

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



Рисунок 4.11. – Закриття отворів на резервуарах за допомогою бандажів

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



Рисунок 4.12. – Комплекти клинів для герметизації ємностей

- перекачуванням НХР із аварійного резервуара в запасний (рис. 4.13.);



Рисунок 4.13. – Системи перекачування НХР із пошкоджених ємностей

Ці роботи здійснюють під керівництвом і за безпосередньої участі спеціалістів відповідної галузі, які обслуговують аварійне обладнання або супроводжують НХР під час транспортування. Зменшення розповсюдження НХР досягають створенням водяних завіс (рис. 4.14.).



Рисунок 4.14. – 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. Основним способом оповіщення населення про дії населення у разі

виникнення аварії в ХНО з викидом НХР є передавання повідомлення за допомогою магістральних мереж мовлення (вуличних і квартирних гучномовців), а також місцевого радіо і телевізійних станцій. 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 НКР на поверхню ґрунтів і водойм можна використовувати різні методи. Розлив НХР на території з метою зменшення площі випаровування здійснюють шляхом перегородження дамбами, створення перешкод на шляху розливу, збирання НХР у природних заглибленнях (шурфи, траншеї) спеціальним обладнанням – уловлювачами. Під час виконання робіт необхідно, перш за все, не допустити виходу НХР до річок, озер, підземних комунікацій, підвалів будівель, споруд тощо. Роботи можна здійснювати 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 здійснюють дегазацію місцевості, виробничих територій, споруд і обладнання, забруднених хімічно небезпечними речовинами.

Ухвалення управлінського рішення керівником ліквідації аварії повинно базуватись на оцінюванні ризиків для рятувальників та населення.

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

Для оцінювання можливих наслідків визначають:

- еквівалентну кількість речовини в первинній і вторинній хмарі;
- площу і глибину зон зараження;

- концентрацію шкідливих домішок в атмосфері;
- час підходу до виділеного об'єкта або регіону;
- інші параметри, що характеризують небезпечний вплив шкідливих і токсичних речовин, необхідних для оцінювання наслідків.

Територіальний ризик у певній точці зони аварії k та період часу t з викидом небезпечних хімічних речовин можливо визначати:

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

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

За результатами розрахунків визначають можливе число потерпілих, зокрема з летальним наслідком. Для цього порівнюють розрахункові дані зі значенням прийнятного 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.)

До того ж на хімічно небезпечному об'єкті та у керівника ліквідації аварії повинна бути детальна інформація щодо негативного впливу небезпечної речовини, що потрапляє у навколишнє середовище. На прикладі аміака така карта може містити наступну інформацію:

«Аміак – безбарвний газ із гострим подразнюючим запахом (нашатирного спирту), їдкий, легший за повітря. В атмосфері утворює холодну білу туманну хмару, яка перебуває біля поверхні землі. У результаті нагрівання газова хмара піднімається. Аміак негайно взаємодіє з вологою на поверхні шкіри, очей, рота, слизових поверхонь, утворюючи їдку речовину,

що призводить до некрозу тканин. Аміак – сполука, легша, ніж повітря, тому для захисту слід використовувати укриття, підвали та нижні поверхи будівель.

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, що може ускладнити виявлення речовини в повітрі.

- Доведено, що діти більш чутливі до впливу аміаку, ніж дорослі, оскільки площа поверхні легенів у них більша пропорційно до розміру тіла. Через менший зріст у порівнянні з дорослими особами, діти є ближче до землі, де концентрація аміаку, як правило, підвищена.

- У разі прямого контакту зі шкірою або очима аміак викликає початковий подразнювальний ефект. У підвищених концентраціях ця речовина може спричинити опіки шкіри та ураження очей, що може призвести до сліпоти. Ступінь ураження очей можна визначити протягом тижня після контакту з аміаком.

- Потрапляння в організм підвищених концентрацій аміаку під час вживання харчових продуктів може призвести до ураження ротової порожнини, гортані та шлунково-кишкового тракту.

- Протиотрути від отруєння аміаком не існує, але можна зменшити його вплив.

Правила поведінки в умовах викиду (виливу) аміаку:

- виходити із зараженого району необхідно перпендикулярно напрямку вітру;

- якщо немає можливості вийти з району зараження, необхідно перебувати 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 увімкнути змішувач на мілке розпилення (вода поглинає аміак із повітря), вентиляцію вимкнути (оскільки ця система витягує чисте повітря і всмоктує забруднене);

- якщо відчуваєте запах аміаку, дихайте через зволожену марлеву пов'язку (бажано змочити 5%-вим розчином оцтової або лимонної кислоти).

Перша допомога у разі отруєння аміаком:

- виведіть постраждалого на свіже повітря;
- дайте йому теплого молока з харчовою содою;
- одягніть ватно-марлеву пов'язку, змочену водою, краще 5%-вим розчином оцтової або лимонної кислоти;
- у разі потрапляння в очі – промийте водою або протріть вазеліном чи оливковою олією;
- за умови ураження шкіри – обмийте чистою водою, зробіть примочки з 5%-го розчину оцтової або лимонної кислоти.

Після здійснення аварійно-рятувальних робіт в осередку хімічного забруднення підрозділи виконують повну спеціальну обробку техніки та особового складу. Пункт спеціальної обробки розгортають на незабрудненій місцевості на межі маршрутів виходу із зони хімічного забруднення. Після виконання спеціальної обробки підрозділи виводять 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 здійснення таких основних етапів ліквідації НС, як здійснення розвідки, локалізація викиду НХР, рятування людей, здійснення евакуації та дегазації 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 за розділом 4.

1. Розроблена загальна система організації процесу ліквідації надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів, яка передбачає здійснення 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. Враховуючи характеристики 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 містить технічні елементи збору, оброблення та передачі даних. Інтеграція запропонованої методики в загальну структуру управління з ліквідації надзвичайних ситуацій дозволяє здійснювати оцінювання небезпеки за реальних умов локалізації викиду. Підвищення точності та оперативності оцінювання небезпек за допомогою запропонованої методики дозволить підвищити безпеку роботи рятувальників в зоні аварії та заздалегідь організувати здійснення 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 здійснення таких основних етапів ліквідації НС, як здійснення розвідки, локалізації викиду НХР, рятування людей, здійснення евакуації та дегазації 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

В монографії наведено результати розв'язання актуальної науково-практичної задачі у галузі цивільного захисту, а саме: розроблено методику прогнозування хімічної обстановки за умови виникнення аварій 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 були сформульовані наступні висновки:

1. Виконано аналіз нормативної бази України з питань ліквідації надзвичайних ситуацій техногенного характеру, зокрема 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 діють на основі міжнародної правової бази. Здійснено 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 вихід з ладу 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. Виконано аналіз різних підходів до прогнозування зон хімічного забруднення. Як свідчить аналіз, основною тенденцією розвитку систем прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій є автоматизація процесу розрахунку та інтеграції картографічних додатків до програмного комплексу, однак наразі

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 у разі виникнення аварій з викидом небезпечних газів, яка діє на основі математичної моделі розповсюдження небезпечного газу в атмосферному повітрі за його активного осадження 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 за умови роботи 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 розробленої математичної моделі. Використання у процесі моделювання методу скінченних різниць дозволяє отримувати числові рішення просторового розподілу концентрації газу за його осадження струменем довільної інтенсивності та форми. Запропонований метод математичного опису процесу сорбції небезпечних газів дозволяє обирати довільну кількість та просторове розміщення вузлових точок, які задовольняють умову Куранта-Фрідрікса-Леві. Розроблено керуючий алгоритм методики прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій з викидом небезпечних газів, який діє на основі послідовності трьох блоків – моніторингу зони надзвичайної ситуації, прогнозування наслідків надзвичайної ситуації та ухвалення управлінського рішення.

3. Виконано експериментальну перевірку достовірності розроблених

моделей та ефективності розробленої методики на їх основі. З цією метою розроблено експериментальну камеру для дослідження сорбції газів, яка дозволяє досліджувати динаміку газових потоків різної інтенсивності під впливом дисперсного рідинного потоку. Можливості дослідження сорбційних процесів визначають швидкість повітряного потоку в діапазоні від 0 до 6 м/с та дисперсність рідинного потоку до 0,1 мм. Виконані в експериментальній камері дослідження просторового розподілу аміаку за різної інтенсивності повітряного потоку та різної інтенсивності дисперсного потоку води у процесі осадження 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 за активного осадження у 4 рази. На практичному прикладі показано, що запропонована методика дозволяє суттєво підвищити ефективність ліквідації хімічних аварій за рахунок більш інтенсивного осадження за умов 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 передбачає здійснення 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 під час ліквідації надзвичайних ситуацій дозволяє здійснити оцінювання небезпеки за реальних умов локалізації викиду. Підвищення точності та оперативності оцінювання небезпек за допомогою запропонованої методики дозволить підвищити безпеку роботи рятувальників в зоні аварії та заздалегідь організувати здійснення 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., Vasylchenko 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., Довгало 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. Алюян 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 B01D 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., Тютюник 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 обробки 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. Серия «Информатика, кибернетика и 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. Моделивання якості атмосферного повітря та відповідні моделюючі системи / А.В. Яцишин // Моделивання та інформаційні технології. – 2012. – Вип. 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., Baganova 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., Krasovitsov 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. Dałbrowski. 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., Tezikov 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. Hervoue 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.

Наукове видання

Мельниченко Андрій Сергійович

Кустов Максим Володимирович

Демент Максим Олександрович

**ПРОГНОЗУВАННЯ ХІМІЧНОЇ ОБСТАНОВКИ ПРИ АВАРІЯХ З
ВИКИДОМ НЕБЕЗПЕЧНИХ ГАЗІВ**

Монографія

Підписано до друку 25.04.2025 р. Формат 60х90 1/16.

Папір 80 г/м². Ум.друк. арк. 9,9

Тираж прим. Вид. № 34/19. Обл.вид арк. 6,1

Сектор редакційно-видавничої діяльності

Національного університету цивільного захисту України

18034, м. Черкаси, вул. Онопрієнка, 8

www.nuczu.edu.ua